

**Estudo sobre a Precipitação Química de Fósforo
como forma de Remediação do Estado Trófico
da Lagoa das Furnas, S. Miguel - Açores**

Marília Alexandra Almeida Rasões

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Perfil Engenharia Sanitária.

Orientadora: Prof^a Doutora Maria da Conceição Raimundo dos Santos

Lisboa
2008

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Maria da Conceição Raimundo dos Santos, por me ter dado a oportunidade de realizar este estudo e pela amizade, orientação, incentivo e transmissão de conhecimentos, fundamentais à realização da presente dissertação. Agradeço igualmente o enorme apoio sempre fornecido na realização dos procedimentos laboratoriais tanto em Lisboa como nos Açores, sendo uma mais valia e um bom adiantamento em todo o trabalho a realizar.

À D.^a Luísa Caldeira, pelo precioso apoio prestado nas determinações analíticas realizadas, por toda a disponibilidade e simpatia que sempre me concedeu, a mim e a todos os meus parceiros de laboratório.

À D.^a Adélia, pelo apoio prestado e toda a disponibilidade oferecida neste período e por toda a boa disposição que sempre apresentou.

À Dr.^a Andrea Malcata pela disponibilização do seu laboratório de trabalho e por todo o apoio prestado durante o período passado nos Açores e por pôr à disposição todo o material necessário à realização dos ensaios laboratoriais.

À Dr.^a Dina Pacheco por toda a boa vontade, simpatia e disponibilidade com que nos recebeu nos Açores.

À Dr.^a Maria José Correia pela orientação e pelo apoio prestado na realização dos ensaios de alcalinidade aquando a sua realização nos Açores e por toda a simpatia que sempre me dispensou.

À Engenheira Carla Rodrigues do laboratório CQFB associado Requimte – Rede de Química e Tecnologia, pelo apoio prestado na obtenção dos dados relativos à concentração de alumínio solúvel presente nas diversas amostras fornecidas.

Às empresas, *Rivaz Química*, *Quimitejo* e *Quimitécnica* pela disponibilização dos preços e respectivas fichas técnicas dos produtos químicos a utilizar.

Aos meus colegas e amigos, por todo o apoio e amizade disponibilizados e por todos os bons momentos passados durante estes anos de convívio.

À Catarina, à Teresa, à Vera e por vezes o Luís, a Gersylene, a Sofia, entre outros, pela partilha das bancadas de trabalho e ainda por toda a compreensão e amabilidade demonstrada em todos os procedimentos laboratoriais realizados.

À minha família, pela enorme paciência, compreensão, apoio e carinho demonstrados, tanto no decorrer dos anos de curso, como no decorrer deste trabalho, a minha admiração e gratidão para todo o sempre. Obrigada...

RESUMO

O presente trabalho teve por objectivo estudar a possibilidade de remoção de fósforo da água da Lagoa das Furnas – S. Miguel (Açores) por precipitação química do mesmo, como forma de remediação para reverter o estado trófico em que aquela massa de água se encontra.

A eutrofização, como um processo de enriquecimento de nutrientes, conduz a alterações da qualidade da água e da estrutura e função das comunidades existentes em meios aquáticos. Considera-se o aumento do afluxo de fósforo aos meios aquáticos como o principal responsável pela eutrofização dos mesmos, apesar da influência de outros nutrientes, como o azoto, não poder ser menosprezada para o controlo do estado trófico das massas hídricas [19].

A Lagoa das Furnas apresenta já há algum tempo características de meio eutrofizado por estar a receber cargas de azoto e fósforo que são, respectivamente, 5,7 e 4,3 vezes superiores às cargas com perigo de eutrofização. Esta situação, diagnosticada pela primeira vez em 1988/89, tem vindo a ser acompanhada desde então [14].

Para prossecução do objectivo definido procedeu-se inicialmente à caracterização da qualidade da água da Lagoa das Furnas, seguindo-se a realização de diversos ensaios laboratoriais de “Jar-Test” com diferentes tipos e doses de coagulante, com e sem correcção da alcalinidade, para determinar o tipo de coagulante mais indicado, dose óptima do mesmo e condições adequadas (pH, alcalinidade) para o processo de coagulação-floculação-decantação. Estes ensaios foram realizados inicialmente com água criada laboratorialmente à semelhança da água da Lagoa das Furnas e depois repetidos com amostras recolhidas directamente naquele meio hídrico.

Nos ensaios realizados com a adição do sulfato de alumínio, foi ainda determinada a concentração de alumínio solúvel presente na água após a adição deste coagulante.

Com base nos resultados experimentais e nas conclusões retiradas da variedade de ensaios realizados, foi efectuada uma análise prévia dos custos de implementação do tratamento de remoção de fósforo na Lagoa das Furnas e a viabilidade da sua aplicação.

Palavras-Chave: Fósforo; Eutrofização; Qualidade da Água; Precipitação Química; Alumínio

ABSTRACT

The present work aimed to study the possibility of removing phosphorus from the water of the Furnas lake – S. Miguel (Azores) by chemical precipitation, as a sort of a remediation measure to revert the lake eutrophic state.

Eutrophication is a nutrients enrichment process, that leads to modifications on water quality and structure and function of aquatic environments of existing communities. The increase of phosphorus flux to the aquatic environment is considered as the main responsible for eutrophication, although the influence of other nutrients, like nitrogen, should be considered when water bodies trophic state must be controlled [19].

The Furnas lake presents already eutrophic characteristics because nitrogen and phosphorus fluxes to the water body have been respectively, 5,7 and 4,3 higher than the eutrophication dangerous loadings. This situation is known since 1988/89, and had been monitored until now [14].

To achieve the objectives of this work, we first proceed to the characterization of the Furnas lake water, followed by a several “*Jar-Test*” laboratory essays performed with different types and doses of coagulants, with and without alkalinity correction, for the determination of the most suitable type of coagulant to use, the ideal dose and the appropriate conditions for the coagulation-flocculation-decanting process. This essays were fulfilled initially with a synthetic water simulating the Furnas lake water and then repeated with water samples collected directly from the lake.

On essays done with the addition of aluminium sulfate, the determination of the soluble aluminium concentration present in the water after the addition of this coagulant was also done.

Based on the results and on several conclusions from the performed essays, a cost analysis of the water treatment implementation was done to assess the viability of its application.

Keywords: Phosphorus; Eutrophication; Water Quality; Chemical precipitation; Aluminium

Lista de Abreviaturas

BH – Bacia Hidrográfica

Inorg. – Inorgânico

Mix – Água Bruta inicial

Orto – Ortofosfatos

pp – Precipitados

P_{Inorg} – Fósforo Inorgânico

P_{Solúvel} – Fósforo Solúvel

P_{Total} – Fósforo Total

Vol. – Volume

Índice

	Págs.
AGRADECIMENTOS	2
RESUMO	3
ABSTRACT	4
Lista de Abreviaturas	5
Índice de Figuras	8
Índice de Tabelas	9
1. OBJECTIVOS	10
2. INTRODUÇÃO	10
2.1. <u>A Lagoa das Furnas</u>	10
2.2. <u>Importância do fósforo para os processos de eutrofização</u>	11
2.3. <u>Remoção de Fósforo por Precipitação Química</u>	15
2.4. <u>Precauções com a utilização de alumínio</u>	19
3. METODOLOGIA	20
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DA LAGOA DAS FURNAS	20
3.1.1. <u>Amostragem e Amostras</u>	20
3.1.2. <u>Parâmetros Analisados e Métodos Analíticos Utilizados</u>	20
3.2. DETERMINAÇÃO DA DOSE ÓPTIMA DE COAGULANTE	21
3.2.1. <u>Ensaios de “Jar Test”</u>	22
3.2.1.1. <i>Materiais e Reagentes</i>	22
3.2.1.2. <i>Metodologia dos ensaios</i>	22
3.2.2. <u>Caracterização das amostras de água a tratar e dos sobrenadantes</u>	22
3.2.2.1. <i>Alcalinidade Total</i>	22

3.2.2.2. <i>Turvação</i>	23
3.2.2.3. <i>pH</i>	23
3.2.2.4. <i>Volume de precipitados</i>	23
3.2.2.5. <i>Compostos de Fósforo</i>	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ÁGUA UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO	24
4.2. COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO COM ADIÇÃO DE SULFATO DE ALUMÍNIO	25
4.2.1. <u>Ensaio sem correcção da alcalinidade</u>	25
4.2.2. <u>Ensaio com correcção da alcalinidade</u>	30
4.3. COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO COM ADIÇÃO DE CLORETO FÉRRICO	35
4.4. COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO COM ADIÇÃO DE ALÚMEN E ALUMINATO DE SÓDIO	37
4.5. AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO E VIABILIDADE DA SUA APLICAÇÃO	43
4.5.1. <u>Sulfato de Alumínio</u>	44
4.5.2. <u>Cloreto Férrico</u>	45
4.5.3. <u>Aluminato de Sódio</u>	45
4.5.4. <u>Quadro-Resumo</u>	46
5. CONCLUSÕES	47
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

Índice de Figuras

	Págs.
Figura 2.1 – Vista sobre a Lagoa das Furnas	10
Figura 2.2 – Evolução do processo de eutrofização em massas de água e sua associação com o uso e ocupação do solo	12
Figura 2.3 – Esquematização dos ensaios de “ <i>Jar-Test</i> ”	15
Figura 2.4 – Hidrólise do alumínio e do ferro	17
Figura 2.5 – Representação gráfica da remoção de fósforo solúvel em função da concentração de sal adicionada	17
Figura 4.1 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio	26
Figura 4.2 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio	26
Figura 4.3 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio	26
Figura 4.4 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio	27
Figura 4.5 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio	28
Figura 4.6 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio	28
Figura 4.7 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio	31
Figura 4.8 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio	31
Figura 4.9 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio	31
Figura 4.10 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio	33
Figura 4.11 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio	33
Figura 4.12 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio	34
Figura 4.13 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de ferro	36
Figura 4.14 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de ferro	36
Figura 4.15 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de ferro	36
Figura 4.16 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio	38
Figura 4.17 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio	38
Figura 4.18 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio	39
Figura 4.19 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio	40
Figura 4.20 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio	41
Figura 4.21 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio	41
Figura 4.22 – Batimetria da Lagoa das Furnas	43

Índice de Tabelas

	Págs.
Tabela 2.1 – Caracterização Morfométrica da Lagoa das Furnas e sua bacia hidrográfica	10
Tabela 2.2 – Critérios de Eutrofização para Albufeiras e Lagoas	11
Tabela 2.3 – pH ótimo para cada coagulante	16
Tabela 2.4 – Aplicação de sais de alumínio e ferro como coagulantes no tratamento de águas	16
Tabela 3.1 – Parâmetros analisados e métodos utilizados	20
Tabela 3.2 – Receita de água sintética pouca dura com adição de fósforo	21
Tabela 4.1 – Características médias da água captada na Lagoa das Furnas nas várias campanhas de amostragem realizadas	24
Tabela 4.2 – Volumes de sulfato de alumínio e doses de alumínio a usar nos ensaios de “Jar-Test”	25
Tabela 4.3 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” realizado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Março (doses de sulfato de alumínio – 0,63 a 6,25 mgAl/L)	25
Tabela 4.4 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” realizado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Maio de 2007 (doses de sulfato de alumínio – 3,75 a 8,13 mgAl/L)	27
Tabela 4.5 – Concentração de Alumínio solúvel presente no sobrenadante	29
Tabela 4.6 – Volumes de sulfato de alumínio e doses de alumínio a usar nos ensaios de “Jar-Test”	30
Tabela 4.7 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” com correcção da alcalinidade efectuado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Março de 2007 (doses de sulfato de alumínio – 3,75 a 8,13 mgAl/L)	30
Tabela 4.8 – Concentração de Alumínio solúvel presente no sobrenadante	32
Tabela 4.9 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” com correcção da alcalinidade efectuado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Maio de 2007 (doses de sulfato de alumínio – 3,75 a 8,13 mgAl/L)	33
Tabela 4.10 – Concentração de Alumínio solúvel presente no sobrenadante	34
Tabela 4.11 – Volumes de solução de Cloreto Férrico a 5 gFe/L e correspondentes doses de Ferro usadas no ensaio de “Jar-Test”	35
Tabela 4.12 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” efectuado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Maio de 2007 (doses de cloreto férrico – 1,72 a 13,77 mgAl/L)	35
Tabela 4.13 – Volumes de solução de sulfato de alumínio e aluminato de sódio e doses de alumínio correspondentes utilizadas nos ensaios de “Jar-Test”	37
Tabela 4.14 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” efectuado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Maio de 2007	37
Tabela 4.15 – Concentração de Alumínio solúvel presente no sobrenadante	39
Tabela 4.16 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” efectuado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Julho de 2007	40
Tabela 4.17 – Concentração de Alumínio solúvel presente no sobrenadante	42
Tabela 4.18 – Custos aproximados associados aos diferentes coagulantes a utilizar	44
Tabela 4.19 – Custos associados à adição de sulfato de alumínio	44
Tabela 4.20 – Custos associados à adição de aluminato de sódio e sulfato de alumínio	45
Tabela 4.21 – Resumo dos custos associados a cada tratamento	46
Tabela 5.1 – Doses ideais e parâmetros analisados	47

1. OBJECTIVO

O presente trabalho teve por objectivo estudar a possibilidade de remoção de fósforo da água da Lagoa das Furnas – S. Miguel (Açores) por precipitação química do mesmo, como forma de remediação para reverter o estado trófico em que aquela massa de água se encontra.

2. INTRODUÇÃO

2.1. A Lagoa das Furnas

A Lagoa das Furnas situa-se no interior da caldeira do vulcão das Furnas, no extremo sudoeste da ilha de São Miguel – Açores, a uma latitude de 37°45'30"N e uma longitude de 25°20'03"W. Pertencente ao Concelho de Povoação, a mancha florestal constitui o uso dominante do solo na bacia hidrográfica desta lagoa, com 51% (534,1 ha) de área, ocupando as áreas de pastagem 44% (460,5 ha) do total (Figura 2.1). Ao longo das margens da Lagoa das Furnas, rodeada por um bosque de vegetação luxuriante, manifestam-se diariamente as mais diversas formas de actividade vulcânica secundária (furnas, fumarolas, nascentes de água quente, etc.) [10] [8].



Figura 2.1 – Vista sobre a Lagoa das Furnas [21]

Com a sua forma elíptica evidenciada na Figura 2.1, a Lagoa das Furnas e respectiva bacia hidrográfica apresentam as características delineadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Caracterização Morfométrica da Lagoa das Furnas e sua bacia hidrográfica [8]

	Área (km ²)	Perímetro (km)	Declive Médio (°)	Altitude Média (m)	Profundidade Máxima (m)	Profundidade Média (m)
Lagoa	1,93	6,3	-	-	15	6,9
BH	12,45	10,53	20	280	-	-

O clima da ilha de S. Miguel é geralmente ameno, com temperaturas médias de 16°C na Primavera, 21°C no Verão, 18°C no Outono e 14°C no Inverno. No entanto, o clima desta ilha é extremamente instável podendo ocorrer aguaceiros em qualquer altura do ano [1].

A compreensão da estrutura e do modo de funcionamento dos ecossistemas aquáticos é deveras importante para adequar a gestão dos recursos de água doce e reduzir ao mínimo as alterações prejudiciais nas bacias hidrográficas, resultantes das actividades antropogénicas desenvolvidas. Na realidade, os sistemas de água doce, tais como a Lagoa das Furnas, estão a ser explorados e degradados a uma velocidade alarmante em resultado das actividades humanas [19].

As bacias de drenagem das diversas lagoas existentes na ilha de S. Miguel apresentam características geomorfológicas e climáticas que facilitam a afluência de nutrientes às massas de água lacustres, favorecendo a aceleração dos processos de eutrofização natural. Na bacia hidrográfica da Lagoa das Furnas, as significativas áreas de pastagem, o elevado número de bovinos, as características das culturas, a exagerada aplicação de fertilizantes, as capacidades de retenção dos fertilizantes pelas culturas e as características climáticas da região, constituem importantes fontes de poluição. Este factos, aliados ao pormenor desta bacia hidrográfica apresentar zonas com declives acentuados (superiores a 20°), potencia uma maior erosão do solo e favorece o arrastamento de materiais que se depositam nas margens e/ou no interior da lagoa, contribuindo para a eutrofização da Lagoa das Furnas [8] [13] [11].

2.2. Importância do Fósforo para os processos de eutrofização

O fenómeno da eutrofização, provocado pelo excessivo aumento de nutrientes (fósforo e azoto) induz o crescimento de algas e outras plantas aquáticas alimentadas pelos nutrientes veiculados pelas linhas de água e escorrências difusas de zonas agrícolas. Este fenómeno tem sido, desde há alguns anos para cá, a maior ameaça para a Lagoa das Furnas. Esta situação, diagnosticada pela primeira vez em 1988/89, tem vindo a ser acompanhada desde então [14].

A eutrofização é um efeito visível do impacto humano sobre os ecossistemas aquáticos, em geral associado ao aumento da sua produtividade, à simplificação estrutural dos componentes bióticos e à redução da capacidade que os organismos possuem para se adaptarem às alterações impostas (redução da estabilidade). A eutrofização das massas hídricas superficiais constitui um dos mais significativos problemas a nível do planeamento e gestão dos recursos hídricos. Este facto deve-se, essencialmente, às características difusas da contaminação com origem agrícola e à respectiva envolvente socio-económica [19] [12].

Numa situação de eutrofização, as entradas excessivas de nutrientes como o fósforo ou o azoto, os mais representativos no contributo para o estado trófico das águas superficiais, podem ultrapassar a capacidade de equilíbrio do ecossistema, havendo aumento da taxa de produtividade em relação à que existiria se o sistema não tivesse sido perturbado [19] [11].

Para a caracterização do estado trófico de uma massa de água, existem diversos critérios de avaliação, tais como: *Critério de Vollenweider* (1968), *Critério de Carlson* (1977), *Critério da OCDE* (1982), *Critério Nacional* (INAG 2002). No entanto, actualmente, em Portugal, o critério quantitativo a utilizar em sistemas lênticos (albufeiras e lagoas) é o Critério Nacional (INAG 2002), uma versão modificada do critério da OCDE. Ambos consideram viável o critério de Vollenweider, mas recorrem a parâmetros diferentes para classificar o estado trófico de uma massa de água [9].

O *Critério Nacional*, definido com o consenso generalizado de diversas entidades, organismos da administração pública e universidades, considera três parâmetros para a avaliação do estado trófico, o *fósforo total* (mgP/m^3), a *clorofila a* (mg/m^3) e o *oxigénio dissolvido* (% saturação), de acordo com os valores esquematizados na Tabela 2.2 [9] [11].

Tabela 2.2 – Critérios de Eutrofização para Albufeiras e Lagoas (INAG,2002) [11]

Parâmetros	Oligotrófica	Mesotrófica	Eutrófica
Fósforo Total (mgP/m^3)	< 10	10 - 35	> 35
Clorofila a (mg/m^3)	< 2,5	2,5 - 10	> 10
Oxigénio Dissolvido (% Saturação)	-	-	< 40

Notas: Os valores correspondem a médias geométricas. A classe atribuída corresponde ao valor mais desfavorável (Conformidade). Deve ser colhida pelo menos uma amostra em cada estação do ano a meio metro da camada superficial.

De um modo geral, todos os critérios consideram o *fósforo total* e a *clorofila a*. Os perigos da eutrofização não resultam apenas das concentrações no meio dos parâmetros que lhe dão origem (sobrecarga de nutrientes), independentemente dos critérios utilizados, mas também o aumento das taxas de crescimento do biota das águas lênticas e a aceleração da taxa de aumento de produtividade em relação à que existiria se o sistema não tivesse sido perturbado. Deste modo, a atribuição de uma classificação de estado trófico não depende unicamente do fósforo, mas também da clorofila a, visto que este parâmetro indica a biomassa fitoplancónica existente e, por consequente, indica a produtividade da massa de água [9].

As principais fontes de fósforo para a água doce são as escorrências superficiais e subterrâneas e os efluentes domésticos e industriais. Na Lagoa das Furnas, os elevados índices de precipitação atmosférica potenciam as escorrências. Todavia, não existem efluentes domésticos e industriais na Lagoa das Furnas e por isso, estes não contribuem para o aumento de fósforo na mesma. As taxas de sobrecarga de fósforo variam com a utilização do solo da bacia de drenagem, a geologia e a morfologia da mesma, a produtividade dos solos, a actividade humana, a poluição e outros factores [19].

Salienta-se que a eutrofização tem normalmente origens antropogénicas, existindo dois processos principais responsáveis pelo aumento muito rápido do fósforo na água e, consequentemente, da produtividade das algas: fertilização intensa dos solos ou através de efluentes domésticos ou industriais. A Figura 2.2 ilustra a evolução do processo de eutrofização em massas de água e a associação do seu nível com o uso e ocupação do solo predominante na bacia hidrográfica [19] [18].

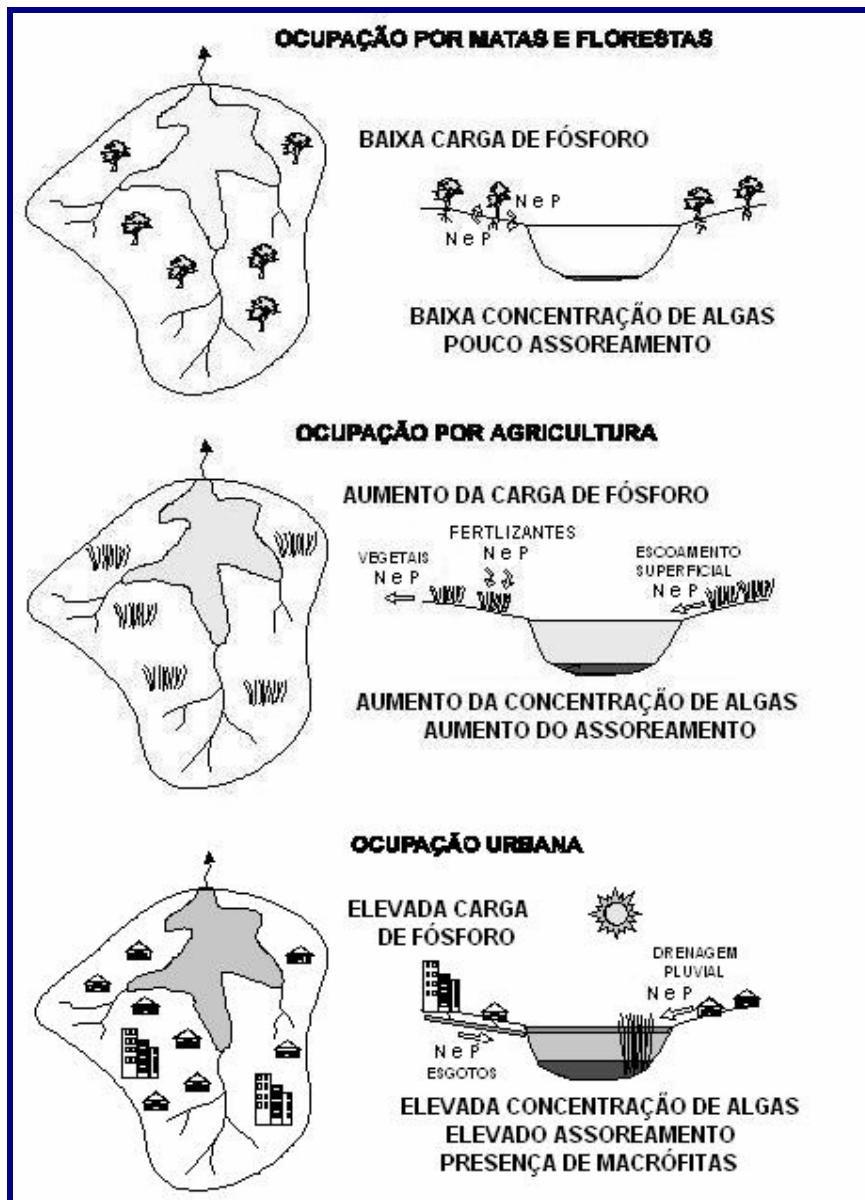


Figura 2.2 – Evolução do processo de eutrofização em massas de água e sua associação com o uso e ocupação do solo [18]

Uma massa de água situada numa bacia de drenagem ocupada por matas e florestas apresenta usualmente uma baixa produtividade, isto é, há pouca actividade biológica. Mesmo nestas condições naturais e de ausência de interferência humana, a massa de água tende a reter sólidos que sedimentam no fundo. Com os fenómenos de decomposição do material sedimentado, há um certo aumento, ainda incipiente, do nível de nutrientes na massa líquida. Como consequência, há um progressivo aumento da população de plantas aquáticas na massa líquida e, em consequência, de outros organismos situados em níveis superiores na cadeia alimentar (cadeia trófica) [18].

Na bacia hidrográfica, a maior parte dos nutrientes é retida dentro de um ciclo parcialmente fechado. As plantas, ao morrerem e caírem no solo, sofrem decomposição, libertando nutrientes. Numa região de matas e florestas, a capacidade de infiltração da água de chuva no solo é elevada. Em consequência, os nutrientes lixiviam pelo solo, onde são absorvidos pelas raízes das plantas, voltando a fazer parte da sua composição, e fechando, desta forma, o ciclo. A entrada de nutrientes na massa de água é reduzido e esta apresenta ainda um nível trófico bem incipiente [18].

A ausência da vegetação natural da bacia para ocupação por agricultura representa, usualmente, uma etapa intermediária no processo de deterioração de uma massa de água. Os vegetais plantados na bacia são colhidos para consumo humano, muito possivelmente fora da própria bacia hidrográfica. Com isto, há uma retirada, não compensada naturalmente, de nutrientes, causando uma quebra no ciclo interno dos mesmos. Para compensar e para tornar a agricultura mais intensiva, são adicionados produtos com elevados teores de nutrientes (azoto e fósforo), os fertilizantes artificiais, adicionados frequentemente em quantidades superiores à própria capacidade de assimilação dos vegetais [18].

A substituição das matas e/ou florestas por zonas agrícolas pode causar também uma redução da capacidade de infiltração no solo. Assim, os nutrientes, já adicionados em excesso, tendem a escoar superficialmente pelo terreno, até atingir, eventualmente, a massa de água. O aumento do teor de nutrientes na massa de água causa um aumento do número de algas e, em consequência, de outros organismos, situados em degraus superiores da cadeia alimentar, culminando com os peixes. O fitoplâncton é, normalmente, a comunidade que mais directa e rapidamente responde a alterações do teor de nutrientes, devido à forma de absorção directa que tem a partir da água [9] [18].

Caso a área da bacia hidrográfica seja unificada por ocupação urbana, podem ocorrer uma série de consequências, desta vez numa taxa bem mais rápida. Estas consequências podem ser: um assoreamento acentuado da massa de água, reduzindo o seu volume útil; uma carga superior de nutrientes como resultado das entradas provenientes da drenagem pluvial urbana e dos esgotos urbanos [18].

Deste modo, há um aumento acentuado da entrada de azoto e fósforo na massa de água, trazendo, em decorrência, um aumento das populações de algas e outras plantas. Dependendo da capacidade de assimilação da massa de água, a população de algas poderá atingir valores bastante elevados, trazendo uma série de problemas. O eventual desenvolvimento descontrolado de alguns organismos fitoplânctónicos (nomeadamente cianobactérias) em condições extremamente favoráveis ao seu crescimento, denominado *bloom* ou florescência, pode conduzir a um perigo acrescido para todos os elementos desse ecossistema, incluindo o Homem, se estes organismos forem produtores de toxinas prejudiciais à saúde humana quando libertadas para o meio aquático [9] [18].

O *bloom* provoca uma diminuição da penetração da energia luminosa nas camadas inferiores da massa de água, causando a morte das algas situadas nestas regiões. A morte destas algas traz, em si, uma série de outros problemas, pois quando entram em decomposição, a matéria vegetal induz um consumo exacerbado das reservas de oxigénio na água e uma degradação geral da qualidade da água, constituindo uma eventual ameaça para a saúde pública [18].

Nas águas, naturais ou residuais, os compostos fosfatados podem encontrar-se na forma de ortofosfatos, polifosfatos e fósforo orgânico. Estes fosfatos encontram-se em solução ou na forma particulada, neste caso em detritos ou ainda em organismos aquáticos. Podem resultar da descarga de efluentes domésticos ou industriais, ou da utilização na agricultura de fertilizantes fosfatados e outros produtos químicos, como os insecticidas organofosforados. Os esgotos domésticos são relativamente ricos em fósforo proveniente não só da destruição metabólica das proteínas e da eliminação de fosfatos pela urina, como também da utilização de detergentes contendo polifosfatos. Para redução significativa de fósforo total no meio e, conseqüentemente, redução da produtividade do meio, deve-se reduzir drasticamente as entradas de fósforo no meio [19].

As estratégias de remediação do estado trófico de uma massa de água usualmente adoptadas podem-se classificar em duas amplas categorias: *Medidas Preventivas* e *Medidas Correctivas*. As *Medidas Preventivas*, que actuam na bacia hidrográfica, compreendem a redução das entradas de fósforo através da actuação nas fontes externas, utilizando estratégias relacionadas com o controlo de águas residuais (esgotos) e da drenagem pluvial para evitar que estas atinjam a massa de água, nomeadamente, tratamento terciário de águas residuais com remoção de nutrientes, controlo do uso e ocupação do solo na bacia, entre outros. As *Medidas Correctivas*, que actuam directamente na massa de água, podem incluir processos mecânicos (arejamento, remoção de sedimentos), processos químicos (precipitação de nutrientes, uso de algicidas) e processos biológicos (biomanipulação). No entanto, sempre que possível, deve-se optar por *Métodos Preventivos*, usualmente mais baratos e eficazes [18].

Uma das formas de remediação do estado trófico de uma massa de água passa pela inactivação (precipitação interna) ou remoção (precipitação externa) dos nutrientes em excesso, como o fósforo. A inactivação do fósforo existente numa massa de água torna-o indisponível para o fitoplâncton. A inactivação do fósforo é, por si só, uma tentativa de sujeitar o fósforo a permanecer permanentemente nos sedimentos dos lagos, reduzindo ou eliminando a sua disponibilidade na coluna de água.

2.3. Remoção de Fósforo por Precipitação Química

A remoção de fósforo por precipitação química compreende um processo de coagulação-floculação-decantação, que envolve a adição de sais metálicos de ferro (cloreto férrico) ou alumínio (sulfato de alumínio), ou ainda de cal (hidróxido de cálcio), à água a tratar por forma a formarem-se precipitados insolúveis que depois podem ser ou não removidos por um processo de decantação. No entanto, a aplicação desta técnica de recuperação de meios aquáticos naturais, para além de dispendiosa, pode ter impactos significativos se não forem utilizadas as adequadas quantidades de coagulante [6] [3].

À desestabilização das partículas designa-se, geralmente, por *Coagulação*. Neste processo, de mistura rápida, o coagulante é introduzido na água e difundido rápida e uniformemente em toda a massa líquida por agitação vigorosa durante um período de tempo relativamente curto, havendo a desestabilização das partículas coloidais por neutralização das suas cargas eléctricas. A *Floculação* consiste no favorecimento das colisões entre as partículas desestabilizadas (colóides em suspensão) por mistura lenta, onde as partículas em contacto se aglomeram e formam flocos de dimensão e peso suficiente para serem removidos da suspensão por *Decantação* ou *Filtração* [7].

O ensaio *Jar-Test*, utilizado como forma de estudo do processo de coagulação-floculação-decantação, consiste basicamente num processo deste tipo, realizado em laboratório, para determinar o coagulante e as dosagens mais adequadas do mesmo a utilizar no tratamento da água para remoção de turvação (orgânica ou inorgânica), cor (verdadeira ou aparente), compostos de fósforo, metais pesados, entre outros. O equipamento é constituído por uma plataforma onde são dispostos seis copos, cada um deles munido de um sistema de agitação mecânica (Figura 2.3) [7].

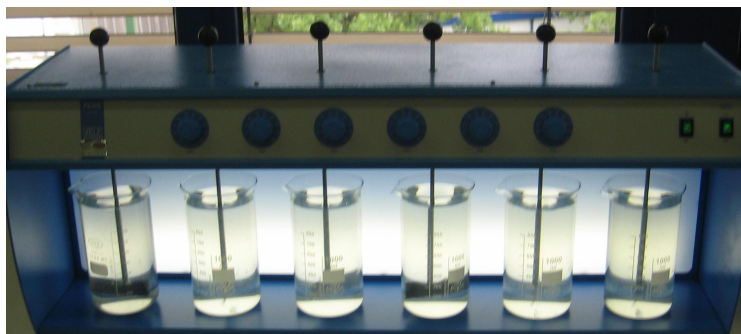


Figura 2.3 – Esquemática dos ensaios de “Jar-Test”

A desestabilização (coagulação) dos contaminantes é feita por adição de compostos, os coagulantes, que podem classificar-se em dois grandes grupos: *coagulantes minerais* (sais de alumínio, ferro e cálcio) que neutralizam as cargas eléctricas dos colóides e os *polímeros orgânicos sintéticos* (não iónicos, aniónicos e catiónicos) que são adsorvidos sobre a superfície do coloide (agregação por pontes interpartículas). No entanto, os polímeros orgânicos sintéticos são pouco recomendáveis por veicularem substâncias indesejáveis [7] [3].

A melhor dosagem de coagulante a utilizar corresponde à que dá origem à redução mais adequada do parâmetro que se pretende remover.

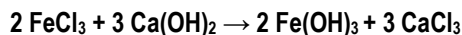
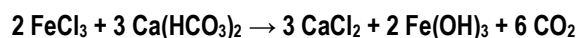
Alguns dos agentes coagulantes inorgânicos que se podem usar para o tratamento de águas são os seguintes:

- ✓ Sulfato de Alumínio – Coagulante mais utilizado pelo seu baixo custo e facilidade de obtenção, podendo ser usado no estado líquido ou em pó. Coagulante que reage com a alcalinidade natural da água. Teoricamente, 1g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ remove 0,5g de alcalinidade expressa em mgCaCO_3/L . Os iões Al^{3+} resultantes da sua dissociação na água reagem com os iões OH^- inerentes à alcalinidade natural da água e formam um

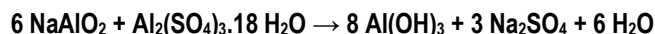
precipitado de natureza gelatinosa (hidróxido de alumínio), responsável pela floculação das impurezas [7].



- ✓ Cloreto Férrico – Coagulante eficiente para águas muito macias e coradas (pH baixo), cuja acidez dificulta uma coagulação eficiente apenas com o sulfato de alumínio ou para águas com gás sulfídrico (cheiro e sabor). Oxidante que reage com a alcalinidade natural das águas e com a cal. Teoricamente, 1 g de FeCl_3 remove 0,92 g de alcalinidade expressa em mgCaCO_3/L e 0,72 g de cal agregada. Coagulante muito utilizado por ser de fácil acesso no mercado [7].



- ✓ Hidróxido de Cálcio – Comumente usado em conjunto com o sulfato de alumínio para correcção da alcalinidade, podendo também ser usado por si só, mas dando origem a resultados menos significativos [7].
- ✓ Aluminato de Sódio – Geralmente utilizado conjuntamente com o sulfato de alumínio para águas macias ou muito coradas. Trata-se de um sal alcalino e por isso adiciona alcalinidade à água em vez de a remover e permite o controlo de pH [7].



Para cada coagulante existe uma zona de pH óptima, onde ocorre o máximo de precipitação (Tabela 2.3). O ajustamento de pH fora da zona óptima de actuação de um coagulante pode-se obter adicionando ácido sulfúrico ou dióxido de carbono para a gama ácida ou a cal (hidróxido de cálcio) ou carbonato de sódio para a gama alcalina [7].

Tabela 2.3 – pH óptimo para cada coagulante [7]

Coagulante	pH
Sulfato de Alumínio – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	5,0 - 8,0
Cloreto Férrico – FeCl_3	5,0 - 11,0
Aluminato de sódio e Sulfato de alumínio	6,0 - 8,5

Em geral, os coagulantes mais comuns a utilizar no tratamento de águas são os sais de metais trivalentes de Alumínio - Al^{3+} e de Ferro - Fe^{3+} (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Aplicação de sais de alumínio e ferro como coagulantes no tratamento de águas [7]

Parâmetro	Coagulante	
	Alumínio (III)	Ferro (III)
Turvação	Para águas de baixa turvação (baixa concentração de partículas).	
Alcalinidade	Valores elevados de alcalinidade dificultam o acerto do pH para uma óptima coagulação. Se não existe suficiente alcalinidade, deve-se adicionar alguma alcalinidade sob a forma de cal ou carbonato de sódio antes do coagulante.	Os valores elevados de alcalinidade também dificultam o acerto do pH para uma óptima coagulação, mas o seu impacto na coagulação é inferior ao do Alumínio.
Temperatura	A temperatura afecta os produtos de solubilidade. Os flocos formados em águas frias tendem a ser mais fracos.	Os flocos formados em águas frias tendem a ser mais fracos.

Os sais de ferro têm algumas vantagens relativamente aos sais de alumínio, tais como a formação de flocos mais pesados e a possibilidade de utilização para uma gama de pH mais ampla. A escolha do coagulante adequado depende da natureza da água a tratar, do custo e

da facilidade de obtenção, em termos comerciais e físicos. A eficácia do coagulante depende também de diversos factores, tais como o pH, quantidade de coagulante, presença de certos iões, tempos de reacção, temperatura e agitação (condiciona a homogeneidade da solução) [7].

A hidrólise decorrente da adição de iões de elevada valência (Fe^{3+} e Al^{3+}) à água provoca variações nas características físico-químicas da mesma (pH, alcalinidade). Do mesmo modo, apresentando a água diferentes características, nomeadamente diferentes pH, obtêm-se diferentes produtos da hidrólise destes compostos (Figura 2.4) [7].

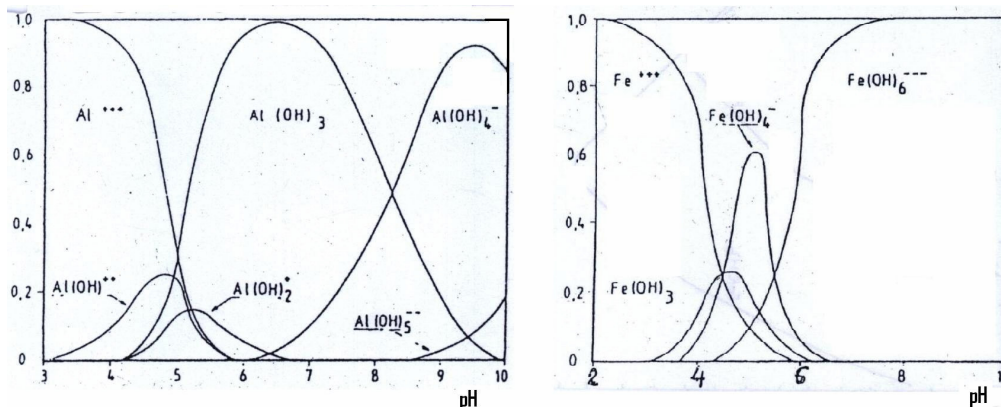
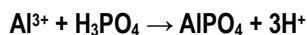


Figura 2.4 – Hidrólise do alumínio e do ferro [7]

O agente coagulante mais utilizado (mais de 90%) é o sulfato de alumínio, pois é bastante fácil de obter, armazenar e manter, bastante adequado para a remoção de turvação e cor. Este coagulante actua na gama de pH compreendida entre 5,0 e 8,0 (óptimo de 5,0 - 6,5) e possui características redutoras [7].

A adição de sulfato de alumínio às águas promove a precipitação química do fósforo, formando-se compostos insolúveis. A reacção que ocorre entre o sulfato de alumínio e as diversas formas de fósforo é essencialmente a seguinte:



Segundo a equação anterior, pode-se inferir que 1 mol de Al^{3+} remove 1 mol de PO_4^{3-} , pelo que, sabendo que o peso molecular do Alumínio é 27g/mol e que o peso molecular dos fosfatos é de 95 g/mol, tem-se que por cada 27 g de alumínio adicionadas se remove 95 g do fósforo na forma de fosfatos.

A relação entre a quantidade de fósforo e a concentração de reagente químico (sal) adicionada à água encontra-se esquematizada na Figura 2.5, individualizando-se duas zonas distintas [6].

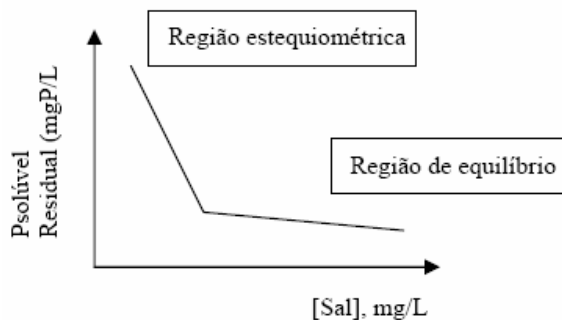


Figura 2.5 – Representação gráfica da remoção de fósforo solúvel em função da concentração de sal adicionada [6]

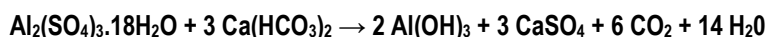
Na região estequiométrica, a remoção de fósforo é proporcional à adição de reagente, enquanto que na região de equilíbrio, a quantidade de reagente a adicionar para remover uma dada quantidade de fósforo é claramente mais elevada [6].

A adição de sulfato de alumínio provoca um consumo de alcalinidade e consequentemente baixa o pH da água, sendo necessário verificar se a água a tratar, tem alcalinidade natural suficiente para se obter um pH ótimo para garantir as condições de coagulação-floculação-decantação, de modo a que após a adição de sulfato de alumínio permaneça ainda na água alguma alcalinidade para manter o efeito tampão da mesma, evitando grandes variações de pH [7].

O pH, que define o carácter agressivo ou incrustante de uma água, é, desta forma, um parâmetro a determinar previamente à realização dos ensaios de coagulação-floculação [7].

A maior parte da alcalinidade em águas naturais resulta dos hidróxidos (OH^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e bicarbonatos (HCO_3^-). Quando a alcalinidade natural da água não é suficiente, torna-se indispensável adicioná-la, normalmente na forma de hidróxido de cálcio ou de carbonato de sódio. Sabendo a quantidade de reagente a utilizar e a quantidade de alcalinidade consumida, torna-se fácil determinar a alcalinidade necessária à reacção [7] [6].

A adição de 1 mg/l de sulfato de alumínio implica a remoção de aproximadamente 0,5 mg/l de alcalinidade (expressa em mgCaCO_3) da água [7].



No caso particular da Lagoa das Furnas (S. Miguel – Açores), a baixa alcalinidade da sua água e a turvação natural que apresenta são características que não devem ser negligenciadas quando se equaciona a precipitação físico-química do fósforo. A análise da turvação vai permitir avaliar a eficiência do processo de coagulação-floculação-decantação quanto à remoção das partículas em suspensão.

2.4. Precauções com a utilização de alumínio

O alumínio pode ser libertado no meio ambiente por processos naturais ou por fontes antropogénicas. As contribuições de alumínio originadas por processos naturais superam as provenientes dos processos antropogénicos, visto que o alumínio é um dos principais constituintes da crosta terrestre, representando aproximadamente 8% da superfície da Terra [5].

As contribuições de alumínio para as massas de água por parte do Homem são mais indirectas, por exemplo, pela emissão de substâncias como óxidos de azoto para a atmosfera que, por sua vez, provocam a ocorrência de chuvas ácidas que acidificam os solos e contribuem para a dissolução de alumínio. Todavia, o uso de alumínio sob a forma de sulfato de alumínio como coagulante no tratamento de águas pode contribuir directamente para a sua presença em meios aquáticos [2].

Em águas superficiais ou subterrâneas é estabelecido um equilíbrio que controla a extensão em que a dissolução de alumínio pode ocorrer. A solubilidade do alumínio depende directamente do pH, podendo então o alumínio apresentar-se sob diversas formas em águas doces, esquematizadas na Figura 2.4 (Hidrólise do alumínio e do ferro). O alumínio pode unir-se a ligandos orgânicos ou inorgânicos ou pode ainda existir como um ião de alumínio livre (Al^{3+}). O nível de hidrólise aumenta com o aumento do pH da solução, resultando numa série de complexos de Al-OH , tais como $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ e $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ [15].

Para além do pH, a espécie química de alumínio predominante em água é igualmente determinada pelo carbono orgânico dissolvido, pelos sulfatos, fosfatos, silicatos e pela matéria particulada suspensa presentes na água [4].

Os efeitos do alumínio e de outros metais na cadeia alimentar dos seres vivos ainda não são conhecidos na sua totalidade. Em geral, no Homem, o alumínio absorvido em pequenas doses é facilmente eliminado pelos rins quando estes se encontram saudáveis. De acordo com Anexo VI (Qualidade da água para consumo humano) do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto, para águas superficiais destinadas à produção de água para consumo humano, em termos de qualidade, o alumínio deverá apresentar valores compreendidos entre os 0,05 e os 0,2 mgAl/L, correspondentes, respectivamente, ao valor máximo recomendado e ao valor máximo admissível [20].

Nos peixes, a disponibilidade biológica e a toxicidade do alumínio variam com a sua espécie. Por exemplo, a toxicidade aguda do alumínio nos peixes pode variar de 0,095 mgAl/L a 235 mgAl/L. Todavia, estes valores podem variar com o pH da água e com a espécie em causa [4].

3. METODOLOGIA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DA LAGOA DAS FURNAS

3.1.1. Amostragem e Amostras

Para a concretização do objectivo proposto, foram realizadas três campanhas de amostragem em Março, Maio e Julho de 2007, onde se recolheram amostras de um ponto central da Lagoa das Furnas, localizado sensivelmente ao centro da Lagoa e na zona de maior profundidade, aproximadamente a 12m.

As amostras foram recolhidas a quatro níveis de profundidade – superfície, 2,5m, 5m e a aproximadamente 0,5 m acima do fundo, sendo esta recolha sempre efectuada à mesma hora do dia (12 h). Estas amostras foram depois misturadas em volumes iguais dos diversos níveis para formar uma amostra homogénea e única sobre a qual se iriam realizar os ensaios de "Jar-Test".

As amostras foram recolhidas com o auxílio de uma garrafa do tipo Van Dorn, de aproximadamente 6 litros de capacidade e depois acondicionadas em frascos de polietileno, à excepção das amostras de fósforo que foram recolhidas em frascos de vidro escuro e, de seguida, preservadas com cloreto de mercúrio.

O transporte das amostras, quer entre o local de amostragem e o laboratório da Direcção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos, Secretaria Regional do Ambiente – Ponta Delgada, quer no transporte aéreo dos Açores para Lisboa, nomeadamente para o laboratório da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa – Monte de Caparica, foi efectuada em caixas isotérmicas refrigeradas e adequadamente seladas.

3.1.2. Parâmetros Analisados e Métodos Analíticos Utilizados

Os parâmetros físico-químicos analisados nas amostras recolhidas, bem como os métodos utilizados são apresentados na tabela seguinte (Tabela 3.1). Em todas as determinações foram utilizadas metodologias preconizadas pelo "Standard Methods for the Examination of Waters and Wastewaters", 20th Edition (1998) [17].

Tabela 3.1 - Parâmetros analisados e métodos utilizados [17]

Parâmetros	Método Analítico
pH	Método potenciométrico
Turvação	Método Nefelométrico
Alcalinidade	Volumetria de Neutralização
Volume de precipitados	Volumetria
Fósforo Total e Fósforo Total Solúvel	Espectrofotometria de absorção molecular após digestão ácida com persulfato
Fósforo Inorgânico	Espectrofotometria de absorção molecular após hidrólise ácida
Ortofosfatos	Espectrofotometria de absorção molecular – método do ácido ascórbico (colorimétrico)
Alumínio	Espectrofotometria de Emissão Atómica (ICP)

As determinações de Alcalinidade foram efectuadas no laboratório da Direcção Regional do Ordenamento do Território e Recursos Hídricos da Secretaria Regional do Ambiente dos Açores nas 6 horas seguintes à amostragem.

3.2. DETERMINAÇÃO DA DOSE ÓPTIMA DE COAGULANTE

Tendo em vista a concretização do objectivo do trabalho, a remoção de fósforo por precipitação físico-química do mesmo, realizaram-se ensaios “Jar-Test” com diversos tipos e doses de coagulantes para determinação da dose óptima dos mesmos e das condições mais adequadas para o processo.

Os ensaios realizados podem agrupar-se da seguinte forma:

- Coagulação-Floculação com adição de sulfato de alumínio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}]$;
- Coagulação-Floculação com adição de sulfato de alumínio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}]$ e de carbonato de cálcio (CaCO_3) para correcção da alcalinidade;
- Coagulação-Floculação com adição de cloreto férrico (FeCl_3);
- Coagulação-Floculação com adição de sulfato de alumínio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}]$ e aluminato de sódio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$).

Foram realizados ensaios preliminares com água produzida em laboratório de características químicas semelhantes às da água da Lagoa das Furnas, e posteriormente realizaram-se ensaios com água recolhida na Lagoa das Furnas e posteriormente transportada para o laboratório do Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente (Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa), no Monte de Caparica ou para o laboratório da Direcção Regional do Ambiente dos Açores, localizado em Ponta Delgada.

A preparação em laboratório de uma água de composição semelhante à da Lagoa das Furnas foi efectuada segundo o procedimento descrito em “*Methods for preparing synthetic freshwaters*”; 1286-1296 e a receita elaborada é apresentada na Tabela 3.2 [16].

Tabela 3.2 – Receita de água sintética pouca dura com adição de fósforo

	Massa (g) de sal por volume de solução	Factor de Conc.	Necessário Retirar da solução Stock
S1	1L	x 1000	1 ml
MgCl₂·6H₂O	20,712 g		
CaCl₂	9,235 g		
Ca(NO₃)₂·4H₂O	0,532 g		
S2	5L	x 1.1	909 ml
CaCO₃	0,185 g		
S3	1L	x 1000	1 ml
Na₂SO₄	15,360 g		
KHCO₃	16,927 g		
NaHCO₃	0 g		
Fósforo	1L	x 1000	1 ml
K₂HPO₄	0,207		

3.2.1. Ensaios de “Jar-Test”

3.2.1.1. Materiais e Reagentes

- Aparelho de “Jar-Test” FC6S VELP Scientifica
- Balança de Precisão AG204
- 6 Copos de 1000 mL Simax
- Copos
- Pipetas
- Pompets

- Solução de Sulfato de Alumínio: 1,25 gAl/L
- Carbonato de Cálcio
- Solução de Cloreto Férrico: 5,00 gFe/L
- Solução de Aluminato de sódio: 1,25 gAl/L

3.2.1.2. Metodologia dos ensaios

1. Determinação da alcalinidade total, turvação, pH, fósforo total, fósforo inorgânico, fósforo solúvel e ortofosfatos iniciais da amostra (água bruta);
2. Confirmação de que a água possuía alcalinidade suficiente para suportar as doses de coagulante (sulfato de alumínio ou outro) a ensaiar;
3. Colocação de 1 litro de amostra em cada um dos seis copos do aparelho de “Jar-Test”;
4. Adição do volume de coagulante (sulfato de alumínio ou outros), previamente estipulado, aos seis copos em simultâneo;
5. Mistura rápida durante dois minutos a uma velocidade de 100-120 rpm para provocar a desestabilização das partículas;
6. Redução da velocidade para 40-50 rpm (mistura lenta - *Floculação*), durante vinte minutos;
7. Decantação das amostras durante vinte minutos;
8. Recolha do sobrenadante de todos os copos e posterior medição da alcalinidade, turvação, pH, fósforo total, fósforo inorgânico, fósforo total solúvel e ortofosfatos. Foram ainda determinados os volumes de precipitados obtidos em cada copo.

3.2.2. Caracterização das amostras de água a tratar e dos sobrenadantes

A caracterização das amostras de água a tratar e dos sobrenadantes foi efectuada de acordo com a metodologia a seguir descrita.

3.2.2.1. Alcalinidade Total

Método volumétrico: Neutralização de um volume conhecido de amostra por uma solução de um ácido forte diluído (ácido sulfúrico), de concentração conhecida, na presença de um indicador (verde de bromocresol) [17].

$$\text{TAC (mg CaCO}_3\text{/L)} = \left(\frac{V2 * 0,02 * 50}{V} \right) * 1000$$

V2 – Volume de titulante gasto (mL);
V – Volume da amostra (mL).

3.2.2.2. Turvação

Método nefelométrico (Turbidímetro HANNA Instruments) [17].

Os resultados de turvação encontram-se expressos em unidades nefelométricas de turvação (NTU) [17].

3.2.2.3. pH

Método potenciométrico (Potenciómetro *ThermoOrion Model 920A*) [17].

3.2.2.4. Volumes de Precipitados

Recorrendo a provetas volumétricas, determinaram-se os volumes de precipitados obtidos com a adição dos diferentes tipos e doses de coagulantes, após a sedimentação dos flocos.

3.2.2.5. Compostos de Fósforo

Neste trabalho, foram determinados os ortofosfatos, o fósforo total, o fósforo total solúvel e o fósforo inorgânico hidrolizável.

As determinações dos compostos de fósforo foram efectuadas pelo método colorimétrico do ácido ascórbico [17], precedido de filtração e digestão ácida com persulfato no caso do fósforo total solúvel e apenas da digestão ácida com persulfato no caso do fósforo total.

Para a determinação do fósforo inorgânico hidrolizável utilizou-se uma digestão ácida com uma solução ácida forte, sem adição de persulfato [17].

A medição das absorvências foi efectuada num Espectrofotómetro *LBK – Ultrospec Pharmacia*, a 880 nm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ÁGUA UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO

Nas três campanhas de amostragem realizadas na Lagoa das Furnas, obtiveram-se diferentes valores para os parâmetros analisados. A variação verificada esteve relacionada essencialmente com a evolução climática dos períodos analisados, pois as amostragens ocorreram em diferentes estações do ano. Os valores obtidos encontram-se sintetizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características médias da água captada na Lagoa das Furnas nas várias campanhas de amostragem realizadas

	Março 2007	Maio 2007	Julho 2007
Temperatura da água (°C)	14,4	18,0	21,1
Oxigénio Dissolvido (mg/L)	10,4	8,6	8,6
% de Saturação	105,1	93,7	98,7
pH	7,57	7,55	7,10
Condutividade (mS/cm)	0,12	0,12	0,13
Turvação (NTU)	11	8	***
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	42	42	44
Cálcio (mg Ca/L)	2,68	2,76	2,82

*** Sem dados devido à avaria na sonda multiparâmetros

Como se pode verificar, a água da Lagoa das Furnas apresentou baixos valores de alcalinidade, que oscilaram entre os 42 e os 44 mg CaCO₃/L, permanecendo praticamente inalteráveis nas diferentes amostragens realizadas. Visto que os valores de cálcio são muito inferiores a 75 mg CaCO₃/L e sabendo que em termos médios a água da Lagoa das Furnas apresenta uma Dureza Total média de 39 mg CaCO₃/L, pode-se considerar a água da Lagoa das Furnas macia ou pouco dura.

4.2. COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO COM ADIÇÃO DE SULFATO DE ALUMÍNIO

Na realização destes ensaios, foram adicionados diferentes quantidades de sulfato de alumínio, apresentadas na Tabela 4.2 e correspondentes à adição de doses de alumínio compreendidas entre 0,63 mgAl/L e 10,00 mgAl/L, utilizando uma solução de sulfato de alumínio com 1,25 gAl/L. Foram realizados ensaios preliminares com a água sintética e após estes, ensaios com a água recolhida na Lagoa das Furnas. No entanto, não se apresentam os resultados obtidos com a água sintética por se tratarem apenas de ensaios preliminares realizados para uma melhor delineação das doses de coagulante a utilizar.

Tabela 4.2 – Volumes de sulfato de alumínio e doses de alumínio a usar nos ensaios de “Jar-Test”

Volume de Sulfato de Alumínio (ml/L)	[Al] (mgAl/L)	Volume de Sulfato Alumínio (ml/L)	[Al] (mgAl/L)
0,5	0,63	5,5	6,88
1,0	1,25	6,0	7,50
2,0	2,50	6,5	8,13
3,0	3,75	7,0	8,75
4,0	5,00	7,5	9,38
5,0	6,25	8,0	10,00

4.2.1. Ensaios sem correcção de alcalinidade

As amostras de água da Lagoa das Furnas utilizadas para estes ensaios de coagulação-floculação-decantação resultaram de uma mistura de volumes iguais de água captada a quatro níveis de profundidade.

No primeiro ensaio, foi utilizada a água recolhida na amostragem realizada em Março de 2007, com as características apresentadas na Tabela 4.1. As doses de sulfato de alumínio utilizadas situaram-se entre 0,63 mgAl/L e 6,25 mgAl/L. Neste ensaio não foi efectuada a correcção da alcalinidade. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.3. As variações dos parâmetros analisados podem ser observadas nas Figuras 4.1 e 4.2.

Tabela 4.3 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” realizado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Março (doses de sulfato de alumínio – 0,63 a 6,25 mgAl/L)

[Al] (mgAl/L)	pH	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	Fósforo Total [µgP/l]	Fósforo Inorgânico [µgP/l]	Fósforo Solúvel [µgP/l]	Ortofosfatos [µgP/l]
0,00	7,57	42	74,0	46,0	13,6	10,2
0,63	7,32	38	60,0	39,9	12,7	7,3
1,25	7,25	35	71,6	45,8	8,8	< 3,0
2,50	7,11	28	37,7	23,1	4,5	< 3,0
3,75	6,93	23	19,1	10,8	4,5	< 3,0
5,00	6,74	17	12,9	6,9	5,0	< 3,0
6,25	6,38	12	20,6	12,8	5,0	< 3,0

Obteve-se uma melhor precipitação, com os flocos obtidos mais visíveis, para o copo com a concentração de alumínio igual a 3,75 mgAl/L.

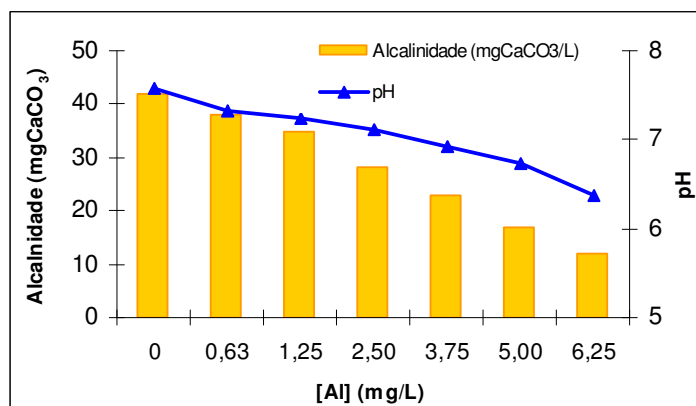


Figura 4.1 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio

Como se pode observar pela análise do gráfico da Figura 4.1, tanto a alcalinidade como o pH decresceram com o aumento da dose de alumínio adicionada.

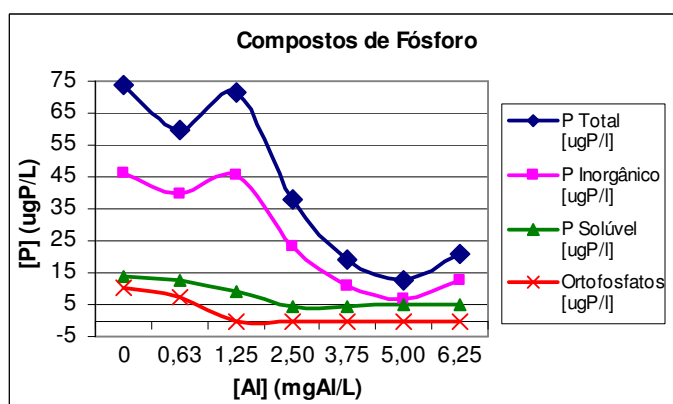


Figura 4.2 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio

As concentrações dos vários compostos de fósforo analisados foram decrescendo até atingir um valor mínimo a 5,0 mgAl/L. A concentração de ortofosfatos, atingiu o mais baixo valor logo para a dose de 1,25 mgAl/L, passando a partir daí a situar-se abaixo do limite de detecção do método utilizado (3 µg/L).

Os resultados obtidos para o fósforo total e inorgânico na amostra tratada com 1,25 mgAl/L revelaram-se inconsistentes.

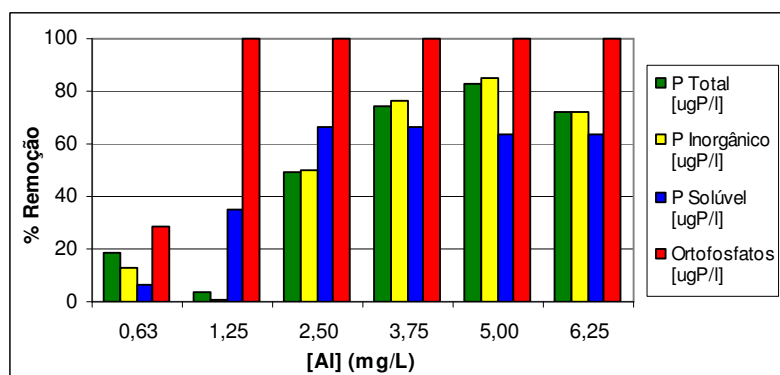


Figura 4.3 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio

Neste ensaio, os ortofosfatos foram os únicos compostos de fósforo a apresentar 100% de remoção. Para os restantes obtiveram-se percentagens de remoção que oscilaram entre 60% e 80% (Figura 4.3).

De um modo geral, pode-se afirmar que os melhores resultados se obtiveram com a adição de 5,00 mgAl/L, no entanto, o acréscimo de remoção de compostos de fósforo que se obteve com esta dose relativamente à dose de 3,75 mgAl/L não foi significativa, pelo que se considera esta última como a mais adequada. Por outro lado, o valor do pH situou-se mais próximo da neutralidade com a dose de 3,75 mgAl/L do que com a de 5,00 mgAl/L.

Para este ensaio, não foi determinado o alumínio solúvel presente no sobrenadante após a realização do processo de coagulação-floculação-decantação.

No segundo ensaio, a amostra de água da Lagoa das Furnas utilizada foi recolhida em Maio de 2007 e possuía as características apresentadas na Tabela 4.1. Neste ensaio, utilizaram-se doses de 3,75 a 8,13 mgAl/L. Para a realização deste ensaio também não foi efectuada a correcção da alcalinidade. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.4. A variação dos parâmetros analisados pode ser observada nas Figuras 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” realizado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Maio de 2007 (doses de sulfato de alumínio – 3,75 a 8,13 mgAl/L)

[Al] (mgAl/L)	pH	Turvação (NTU)	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	Volume de Precipitado (ml)	Fósforo Total [μgP/l]	Fósforo Inorgânico [μgP/l]	Fósforo Solúvel [μgP/l]	Ortofosfatos [μgP/l]
0,00	7,55	8,00	42	0	58,7	27,7	23,6	8,4
3,75	7,21	0,15	22	25	6,4	3,2	6,4	< 3,0
5,00	7,02	0,16	16	30	5,6	< 3,0	5,6	< 3,0
6,25	6,77	0,00	10	38	9,5	< 3,0	9,5	< 3,0
6,88	6,63	0,00	8	42	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0
7,50	6,42	0,00	6	43	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0
8,13	6,26	0,00	4	45	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0

Neste ensaio, ocorreu uma adequada floculação para todas as doses de alumínio adicionadas. Todavia, a sedimentação não ocorreu como seria de esperar pois os flocos formados não se depositaram no fundo mas ficaram dispersos em toda a amostra.

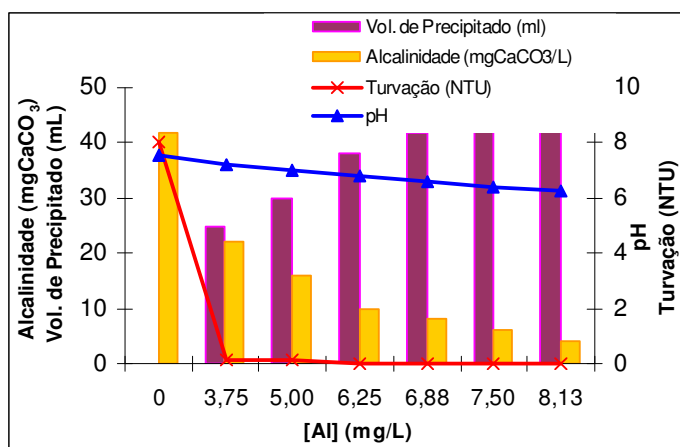


Figura 4.4 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio

Os valores obtidos para o pH, turvação e alcalinidade diminuíram com o aumento da dose de alumínio adicionada à água, enquanto que os volumes dos precipitados aumentaram.

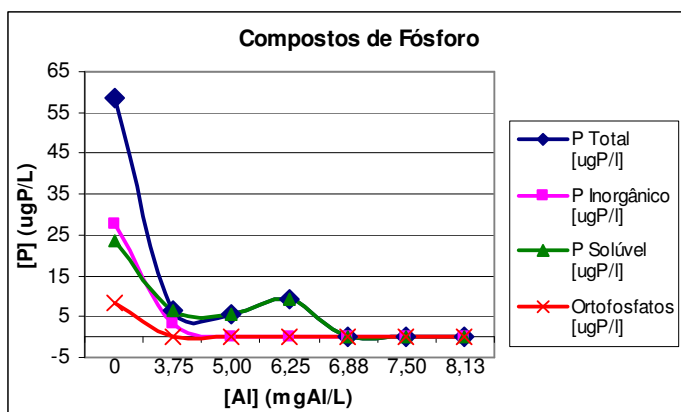


Figura 4.5 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio

No que respeita aos compostos de fósforo, de um modo geral, obtiveram-se bons resultados logo para a dose de 3,75 mgAl/L. Com efeito, obtiveram-se remoções de 89% de fósforo total, de 88% de fósforo inorgânico total e de 73% de fósforo solúvel e as concentrações daqueles compostos atingiram níveis inferiores a 10 µg/L (Figuras 4.5 e 4.6).

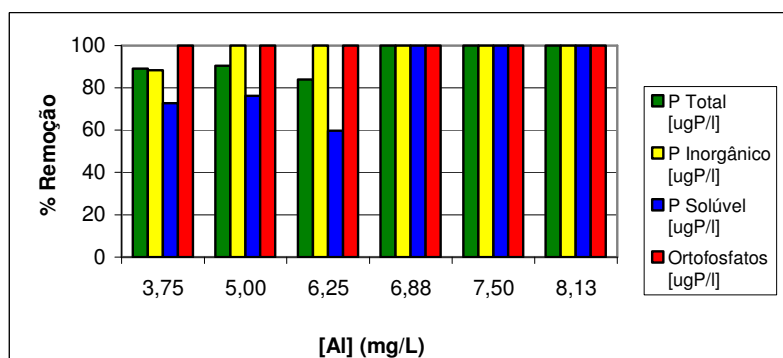


Figura 4.6 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio

Para as doses mais elevadas os resultados apresentaram-se, por vezes, pouco consistentes, provavelmente devido à insuficiente sedimentação ocorrida após 20 minutos de repouso dos ensaios.

Para este ensaio, foi ainda determinada a concentração de alumínio solúvel presente no sobrenadante após a realização do ensaio de coagulação-floculação e cujos resultados se encontram expressos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Concentração de Alumínio solúvel presente no sobrenadante

[Al] Adicionada (mgAl/L)	[Al] Solúvel (mgAl/L)
0,00	< 0,02
3,75	< 0,02
5,00	< 0,02
6,25	< 0,02
6,88	< 0,02
7,50	0,03
8,13	< 0,02

A concentração de alumínio presente nos sobrenadantes manteve-se, em geral, abaixo do limite de detecção do método utilizado (0,02 mgAl/L) e, deste modo, abaixo do valor máximo recomendado definido pelo Anexo VI (Qualidade da água para consumo humano) do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto.

Foi ainda realizado um outro ensaio com doses de alumínio mais elevadas que as usadas nos ensaios anteriores (até 10 mgAl/L), mas que em virtude de se ter verificado uma diminuição demasiado acentuada do pH a partir de 6,25 mgAl/L, os valores obtidos não são apresentados.

4.2.2. Ensaios com correcção da alcalinidade

Na realização destes ensaios, foram adicionados diferentes volumes de sulfato de alumínio às amostras de água em análise, valores esses apresentados na Tabela 4.6 e correspondentes à adição de doses de alumínio compreendidas entre os 3,75 mgAl/L e os 8,13 mgAl/L, utilizando uma solução de sulfato de alumínio com 1,25 gAl/L. Foi ainda adicionado carbonato de cálcio para compensação da alcalinidade removida com a adição deste coagulante.

Tabela 4.6 – Volumes de sulfato de alumínio e doses de alumínio a usar nos ensaios de “Jar-Test”

Volume de Sulfato Alumínio (ml/L)	[Al] (mgAl/L)
3,0	3,75
4,0	5,00
5,0	6,25
5,5	6,88
6,0	7,50
6,5	8,13

O primeiro ensaio, cujos resultados se apresentam na Tabela 4.7, foi realizado com água recolhida na amostragem de Março de 2007, cujas características são apresentadas na Tabela 4.1. Neste ensaio foi adicionado carbonato de cálcio (CaCO_3) para correcção da alcalinidade da água e foram determinados os volumes de precipitados. O carbonato de cálcio foi adicionado em diferentes quantidades, correspondendo cada uma delas à remoção que iria ser promovida pela correspondente adição de sulfato de alumínio. A variação dos parâmetros analisados pode ser observada nas Figuras 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” com correcção da alcalinidade efectuado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Março de 2007 (doses de sulfato de alumínio – 3,75 a 8,13 mgAl/L)

[Al] (mgAl/L)	Adição CaCO_3 (mg/L)	pH	Alcalinidade (mg CaCO_3 /L)	Volume de Precipitado (ml)	Fósforo Total [$\mu\text{gP/l}$]	Fósforo Inorgânico [$\mu\text{gP/l}$]	Fósforo Solúvel [$\mu\text{gP/l}$]	Ortofosfatos [$\mu\text{gP/l}$]
0,00	0,0	7,57	42	0	74,0	46,0	13,6	10,2
3,75	22,0	7,01	27	12	7,6	3,9	4,5	< 3,0
5,00	29,0	6,78	26	12	3,9	< 3,0	3,9	< 3,0
6,25	36,5	6,56	27	17	11,4	< 3,0	4,5	< 3,0
6,88	40,0	6,46	27	14	5,8	< 3,0	< 3,0	< 3,0
7,50	44,0	6,47	23	14	3,9	< 3,0	3,9	< 3,0
8,13	47,5	6,36	21	14	3,9	< 3,0	3,9	< 3,0

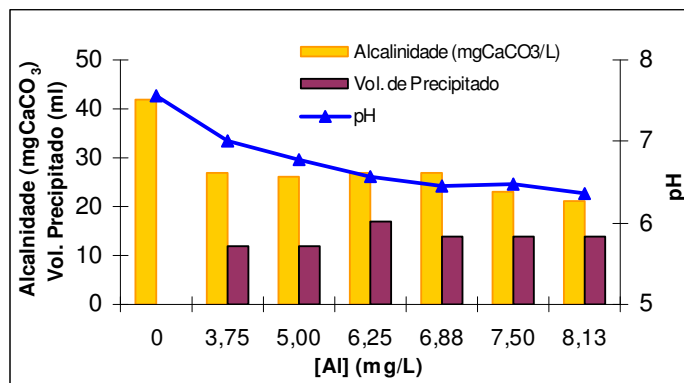


Figura 4.7 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio

Neste ensaio, a adição de carbonato de cálcio (CaCO₃) não permitiu que o pH registasse valores inferiores a 6,0 e, deste modo, a alcalinidade também não apresentou tantas oscilações nem diminuiu tão drasticamente como em ensaios anteriores.

De forma geral, o volume de precipitados aumentou gradualmente com o aumento da dose de alumínio adicionada, à excepção da adição de 6,25 mgAl/L, para a qual houve um aumento súbito do volume de precipitado coincidente com o aumento também observado para o fósforo total.

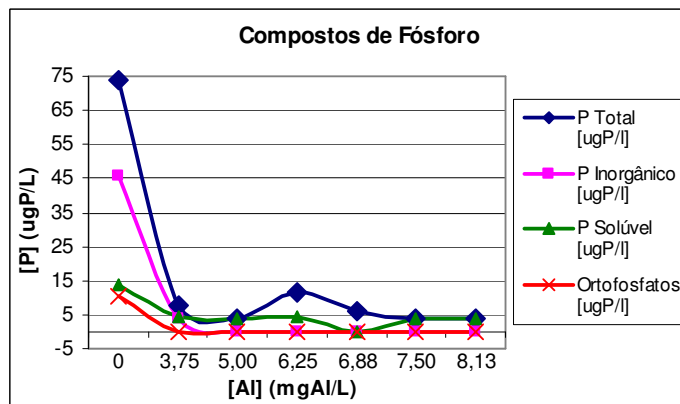


Figura 4.8 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio

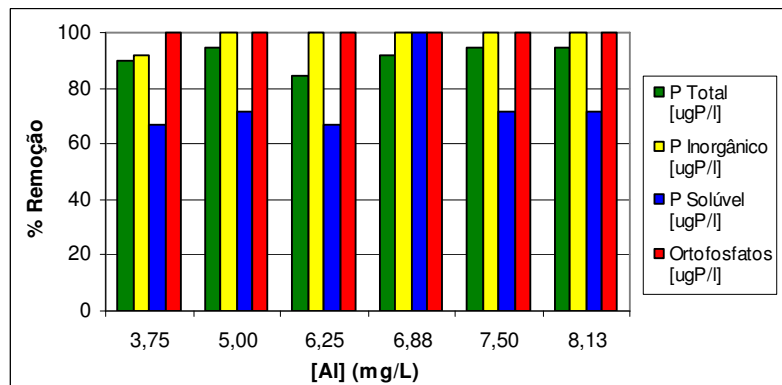


Figura 4.9 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio

Neste ensaio, a concentração de ortofosfatos manteve-se inferior ao limite de detecção do método utilizado (3 µg/L). Quanto aos valores das concentrações de fósforo total e de

fósforo solúvel, estes registaram algumas oscilações, no entanto, para a dose mais baixa (3,75 mgAl/L) obtiveram-se remoções de fósforo total e inorgânico total de cerca de 90%. Além disso, as concentrações de compostos de fósforo passaram, a partir dessa dose, a ser inferiores a 10 µg/L, podendo então considerar-se esta a dose ideal a utilizar (Figuras 4.8 e 4.9).

Para este ensaio, foi ainda determinada a concentração de alumínio solúvel presente no sobrenadante após a realização do ensaio de coagulação-floculação e cujos resultados se encontram expressos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Concentração de Alumínio solúvel presente no sobrenadante

[Al] Adicionada (mgAl/L)	[Al] Solúvel (mgAl/L)
0,00	< 0,02
3,75	0,03
5,00	0,05
6,25	0,04
6,88	0,10
7,50	0,06
8,13	0,16

A concentração de alumínio presente nos sobrenadantes, ao contrário do verificado no ensaio anterior, realizado apenas com a adição de sulfato de alumínio, não se manteve constante, apresentando diversas oscilações. No entanto, os valores obtidos são ainda inferiores ao valor máximo admissível (0,2 mgAl/L) definido pelo Anexo VI (Qualidade da água para consumo humano) do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto. Para a dose ideal de 3,75 mgAl/L, a concentração de alumínio solúvel encontra-se bastante próxima do valor máximo recomendado definido pelo Anexo VI (Qualidade da água para consumo humano) do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto.

No segundo ensaio, realizado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Maio de 2007 (Tabela 4.1), usaram-se as mesmas concentrações de alumínio do ensaio anterior e foi igualmente adicionado carbonato de cálcio para acerto da alcalinidade da água. No entanto, desta vez, adicionou-se uma quantidade fixa de carbonato de cálcio, correspondente a 47,5 mg por litro de amostra. A quantidade de carbonato de cálcio adicionada correspondia à remoção de alcalinidade que seria efectuada pela adição da maior dose de alumínio utilizada. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.9 e a variação dos parâmetros analisados pode ser observada nas Figuras 4.10 e 4.11.

Tabela 4.9 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” com correcção da alcalinidade efectuado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Maio de 2007 (doses de sulfato de alumínio – 3,75 a 8,13 mgAl/L)

[Al] (mgAl/L)	pH	Turvação (NTU)	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	Volume de Precipitado (ml)	Fósforo Total [µgP/l]	Fósforo Inorgânico [µgP/l]	Fósforo Solúvel [µgP/l]	Ortofosfatos [µgP/l]
0,00	7,55	8,00	42	0	51,0	31,6	25,2	11,0
3,75	6,96	0,03	32	29	5,8	< 3,0	5,8	< 3,0
5,00	6,79	0,00	28	35	7,6	3,2	7,1	< 3,0
6,25	6,61	0,00	24	33	4,5	< 3,0	4,5	< 3,0
6,88	6,46	0,00	20	32	5,8	< 3,0	5,8	< 3,0
7,50	6,43	0,00	18	24	4,5	< 3,0	4,5	< 3,0
8,13	6,43	0,00	16	18	3,2	< 3,0	3,2	< 3,0

Neste ensaio ocorreu uma adequada sedimentação do precipitado para todas as doses de alumínio adicionadas, no entanto, verificou-se a existência de alguns flocos superficiais, excepto nas amostras correspondentes às duas últimas doses de alumínio.

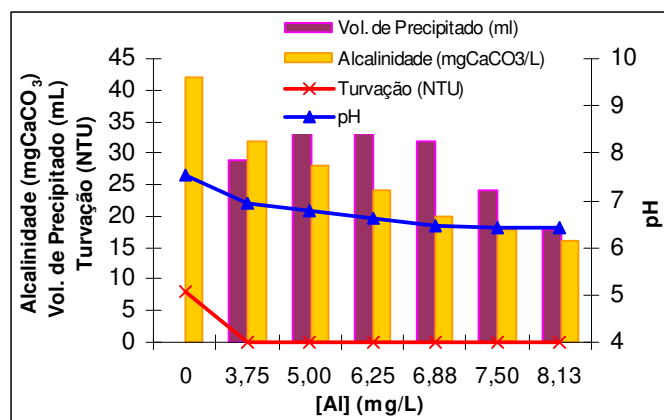


Figura 4.10 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio

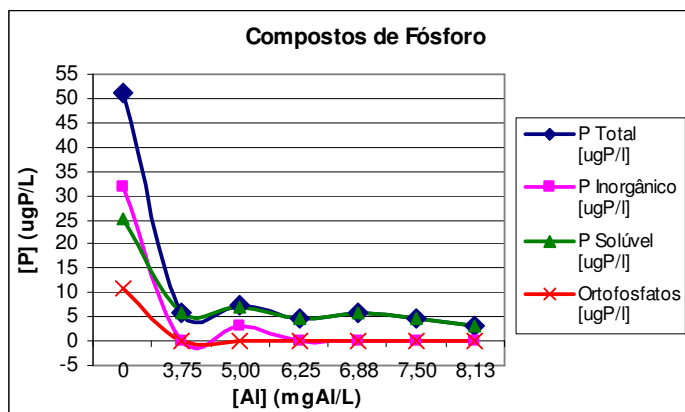


Figura 4.11 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio

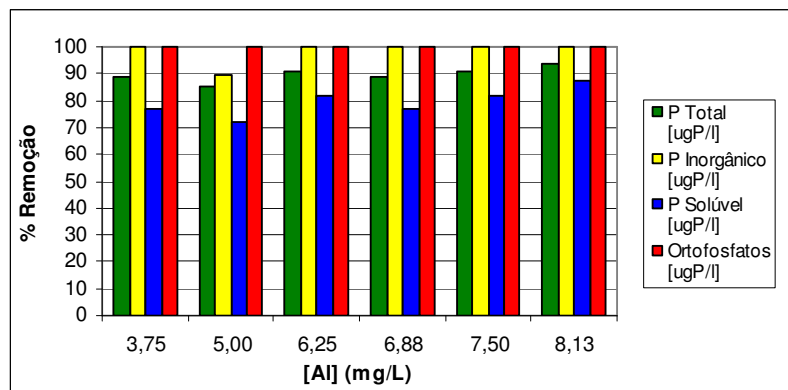


Figura 4.12 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio

Também neste ensaio se verificaram percentagens de remoção de fósforo total e inorgânico total acentuadas (cerca de 90%) logo para a dose de 3,75 mgAl/L (Figura 4.12). A partir desta dose, o aumento de remoção não foi significativo e verificaram-se alguns resultados pouco consistentes. As concentrações de compostos de fósforo situaram-se abaixo de 10 µg/L logo para dose de alumínio mais baixa (3,75 mgAl/L), sendo então esta a dose ideal a ser utilizada com este coagulante (Figura 4.11).

Para este ensaio, foi ainda determinada a concentração de alumínio solúvel presente no sobrenadante após a realização do ensaio de coagulação-floculação-decantação e cujos resultados se encontram expressos na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Concentração de Alumínio solúvel presente no sobrenadante

[Al] Adicionada (mgAl/L)	[Al] Solúvel (mgAl/L)
0,00	< 0,02
3,75	< 0,02
5,00	< 0,02
6,25	< 0,02
6,88	< 0,02
7,50	< 0,02
8,13	< 0,02

A concentração de alumínio presente nos sobrenadantes manteve-se, para todas as doses de alumínio adicionadas, abaixo do limite de detecção do método utilizado (0,02 mgAl/L) e, deste modo, abaixo do valor máximo recomendado definido pelo Anexo VI (Qualidade da água para consumo humano) do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto.

4.3. COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO COM ADIÇÃO DE CLORETO FÉRRICO

Neste ensaio foram utilizados volumes de uma solução de cloreto férrico com 5 gFe/L compreendidos entre os 1,0 e os 8,0 mL por litro de amostra, correspondentes às doses de ferro que constam da tabela seguinte (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 – Volumes de solução de Cloreto Férrico a 5 gFe/L e correspondentes doses de Ferro usadas no ensaio de “Jar-Test”

Volume de Cloreto Férrico (ml/L)	[Fe] (mgFe/L)
1,0	1,72
2,5	4,30
3,5	6,03
5,0	8,61
6,5	11,19
8,0	13,77

Com este coagulante foi realizado um único ensaio, com uma amostra de água da Lagoa das Furnas recolhida em Maio de 2007, e que apresentava as características enunciadas na Tabela 4.1. Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados na Tabela 4.16 e as variações dos diversos parâmetros analisados podem ser observadas nas Figuras 4.22 e 4.23.

Tabela 4.12 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” efectuado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Maio de 2007 (doses de cloreto férrico – 1,72 a 13,77 mgAl/L)

[Fe] (mgFe/L)	pH	Turvação (NTU)	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	Volume de Precipitado (ml)	Fósforo Total [ugP/l]	Fósforo Inorgânico [ugP/l]	Fósforo Solúvel [ugP/l]	Ortofosfatos [ugP/l]
0,00	7,55	8,00	42	0,0	52,3	29,7	24,2	8,4
1,72	7,15	7,01	36	0,0	37,4	21,3	19,4	< 3,0
4,30	6,84	3,22	30	23,0	21,6	12,8	14,8	< 3,0
6,03	6,66	0,42	28	22,5	11,4	5,2	9,5	< 3,0
8,61	6,42	0,00	18	19,0	6,4	< 3,0	6,4	< 3,0
11,19	6,13	0,00	12	16,5	4,5	< 3,0	4,5	< 3,0
13,77	5,73	0,00	6	13,5	5,0	< 3,0	5,0	< 3,0

Neste ensaio, não houve formação de flocos, ou seja, uma correcta floculação para a adição de 1,72 mgFe/L. A melhor precipitação observou-se para a adição das doses de 8,61, 11,19 e 13,77 mgFe/L. Para a adição de 11,19 e 13,77 mgFe/L verificou-se a ocorrência de precipitados à superfície do sobrenadante.

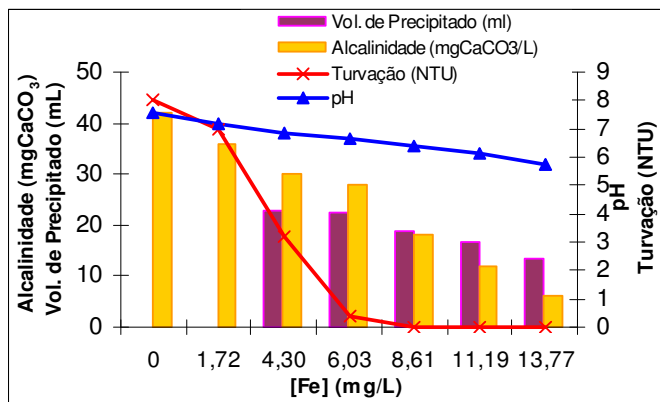


Figura 4.13 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de ferro

Neste ensaio obtiveram-se resultados satisfatórios para todos os parâmetros analisados. Os valores do pH, turvação e alcalinidade diminuíram com o aumento da dose de ferro adicionada (Figura 4.13).

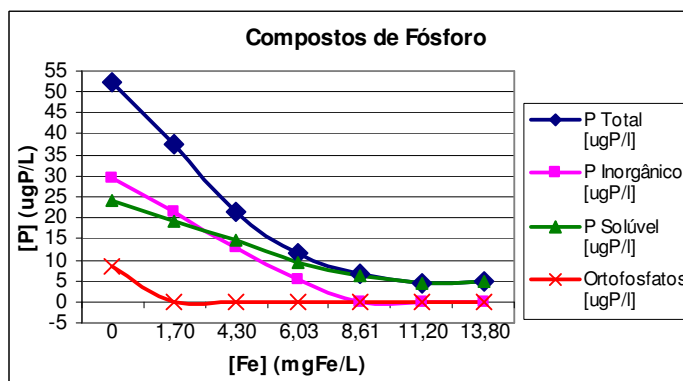


Figura 4.14 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de ferro

Também nos compostos de fósforo se observou uma diminuição gradual dos valores de concentração obtidos com o aumento da dose de ferro adicionada, devendo-se considerar a dose de 8,61 mgFe/L como sendo a ideal.

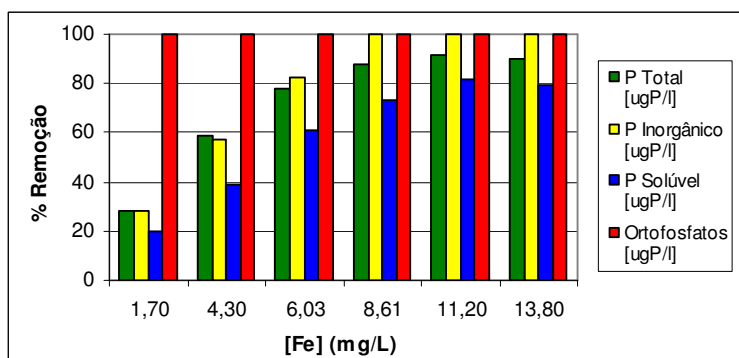


Figura 4.15 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de ferro

Com efeito, para essa dose obtiveram-se, para os ortofosfatos, remoções de 100% e percentagens de remoção de outros compostos de fósforo superiores a 80% (Figura 4.15). Por outro lado, as concentrações finais de compostos de fósforo com a dosagem referida foram inferiores a 10 µgP/L (Figura 4.14).

4.4. COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO COM ADIÇÃO DE ALÚMEN E ALUMINATO DE SÓDIO

Nestes ensaios, foi utilizado sulfato de alumínio (alúmen) conjuntamente com aluminato de sódio, ambos os coagulantes em soluções contendo 1,25 gAl/L. Para estes ensaios, utilizaram-se as razões de alúmen:aluminato de sódio especificadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Volumes de solução de sulfato de alumínio e aluminato de sódio e doses de alumínio correspondentes utilizadas nos ensaios de “Jar-Test”

Razão	Volume de Sulfato Alumínio (ml/L)	Volume de Aluminato de Sódio (ml/L)	[Al] (mgAl/L)
1:0,00	6,5	0,0	8,13
1:0,50	6,5	3,2	12,13
1:0,75	6,5	4,9	14,25
1:1,00	6,5	6,5	16,25
1:1,25	6,5	8,1	18,25
1:1,50	6,5	9,7	20,25

Da junção dos dois compostos resultaram doses de alumínio compreendidas entre os 8,13 mgAl/L e 20,25 mgAl/L.

O primeiro ensaio foi realizado com água recolhida em Maio de 2007 e que possuía as características enunciadas na Tabela 4.1. Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados na Tabela 4.14 e as variações dos diversos parâmetros analisados podem ser observadas nas Figuras 4.16 e 4.17.

Tabela 4.14 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” efectuado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Maio de 2007 (doses de alumínio – 8,13 a 20,25 mgAl/L)

[Al] (mgAl/L)	pH	Turvação (NTU)	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	Volume de Precipitado (ml)	Fósforo Total [µgP/l]	Fósforo Inorgânico [µgP/l]	Fósforo Solúvel [µgP/l]	Ortofosfatos [µgP/l]
0,00	7,55	8,00	42	0	54,9	34,5	12,2	< 3,0
8,13	5,61	0,00	12	30	5,7	< 3,0	3,2	< 3,0
12,13	6,38	0,00	44	35	5,8	< 3,0	3,6	< 3,0
14,25	6,62	0,00	58	45	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0
16,25	6,98	0,00	76	50	5,6	< 3,0	5,3	< 3,0
18,25	7,64	0,47	90	75	8,6	< 3,0	8,6	< 3,0
20,25	8,18	1,18	118	75	12,4	7,3	11,2	< 3,0

Neste ensaio obteve-se uma boa sedimentação dos precipitados para a maior parte das doses de alumínio utilizadas, apresentando-se os flocos pequenos e claros. Todavia, alguns dos flocos formados ficaram retidos nas pás de agitação do aparelho de “Jar-Test”. Na adição das doses de 18,25 mgAl/L e 20,25 mgAl/L, o precipitado apresentou-se disperso por toda a coluna de água.

Os volumes dos precipitados aumentaram gradualmente com o aumento da dose de alumínio. Para as maiores doses de alumínio, o volume dos precipitados foi bastante elevado mas o mesmo encontrava-se disperso por toda a coluna de água, como referido anteriormente.

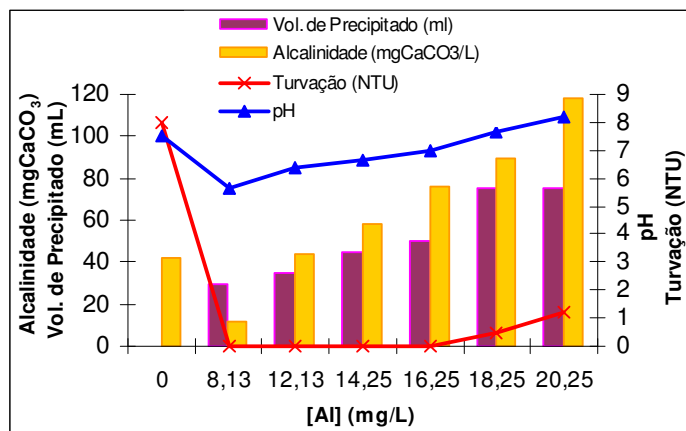


Figura 4.16 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio

A adição de aluminato de sódio evitou que os valores de pH e de alcalinidade diminuíssem tanto como tinha acontecido quando se usou apenas sulfato de alumínio, chegando mesmo a aumentar de forma gradual com o aumento da dose de aluminato adicionada.

Em termos de turvação, esta foi diminuindo com o aumento da dose de alumínio. Todavia, quando a dose de aluminato de sódio se tornou superior à de sulfato de alumínio, os valores de turvação tornaram a aumentar (Figura 4.16).

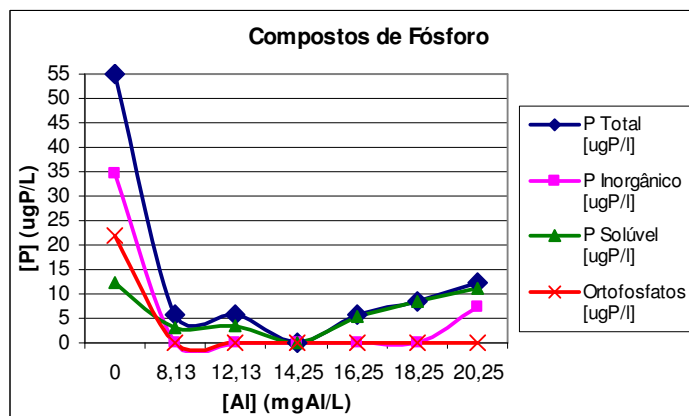


Figura 4.17 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio

De um modo geral, os valores obtidos para os compostos de fósforo diminuíram com o aumento da dose de alumínio adicionada até que a razão de aluminato de sódio:sulfato de alumínio atingiu o valor de 1:0,75. A partir daí, a concentração dos compostos de fósforo tornou a aumentar (Figura 4.17).

Deve-se referir que para a razão 1:0, em que apenas ocorreu a adição de sulfato de alumínio, se obtiveram, para os compostos de fósforo, resultados considerados satisfatórios, apresentando-se estes valores inferiores a 10 µg/L. No entanto, o pH e a alcalinidade apresentaram valores muito baixos, o que inviabiliza a utilização desta dose de alumínio.

Pode-se considerar, no entanto, que a razão de sulfato de alumínio:aluminato de sódio mais adequada foi 1:0,50, com uma adição de 12,13 mgAl/L. Com efeito, a razão 1:0,50 apresentou resultados bastante satisfatórios, com elevadas percentagens de remoção, superiores a 80%, para a maioria das formas de fósforo analisadas (Figura 4.18), enquanto se verificava um valor adequado de pH (6,38) e uma alcalinidade residual aceitável (44 mgCaCO₃).

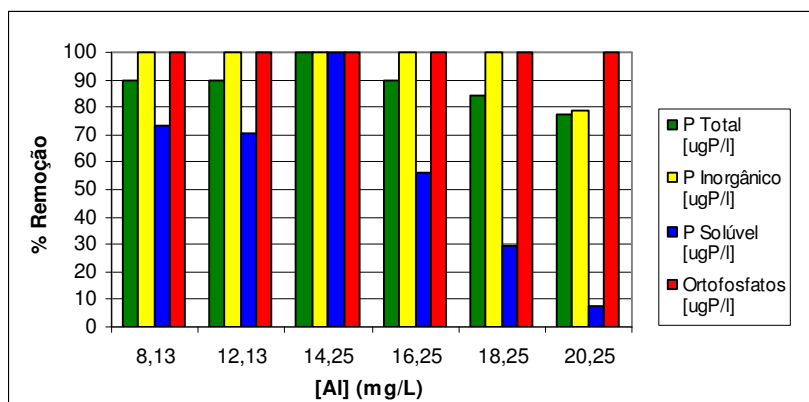


Figura 4.18 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio

Para este ensaio, foi ainda determinada a concentração de alumínio solúvel presente no sobrenadante após a realização do ensaio de coagulação-floculação-decantação e cujos resultados se encontram expressos na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Concentração de Alumínio solúvel presente no sobrenadante

[Al] Adicionada (mgAl/L)	[Al] Solúvel (mgAl/L)
0,00	< 0,02
8,13	< 0,02
12,13	0,02
14,25	< 0,02
16,25	< 0,02
18,25	0,08
20,25	1,07

A concentração de alumínio presente nos sobrenadantes manteve-se, em geral, abaixo do limite de detecção do método utilizado (0,02 mgAl/L) e, deste modo, abaixo do valor máximo recomendado definido pelo Anexo VI (Qualidade da água para consumo humano) do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto. Todavia, para as doses de 18,25 mgAl/L e 20,25 mgAl/L, os valores da concentração de alumínio aumentaram, chegando mesmo na última dose, a ser superior ao valor máximo admissível definido pelo Anexo VI (Qualidade da água para consumo humano) do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto.

Realizou-se um ensaio idêntico ao anterior, para confirmação dos resultados obtidos, com água da Lagoa das Furnas recolhida em Julho de 2007 que possuía as características enunciadas na Tabela 4.1. Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados na Tabela 4.16 e as variações dos diversos parâmetros analisados podem ser observadas nas Figuras 4.19 e 4.20.

Tabela 4.16 – Resultados obtidos no ensaio de “Jar-Test” efectuado com água da Lagoa das Furnas recolhida em Julho de 2007 (doses de alumínio – 8,13 a 20,25 mgAl/L)

[Al] (mgAl/L)	pH	Turvação (NTU)	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	Volume de Precipitado (ml)	Fósforo Total [μgP/l]	Fósforo Inorgânico [μgP/l]	Fósforo Solúvel [μgP/l]	Ortofosfatos [μgP/l]
0,00	7,10	7,12	44	0	50,6	39,0	28,2	22,1
8,13	5,99	0,00	10	30	3,9	3,2	< 3,0	< 3,0
12,13	6,62	0,00	46	35	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0
14,25	6,90	0,00	62	40	3,2	< 3,0	< 3,0	< 3,0
16,25	7,25	0,00	78	50	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0
18,25	7,81	3,37	102	50	10,0	8,2	5,5	< 3,0
20,25	8,26	4,53	120	55	13,2	11,0	4,8	< 3,0

Neste ensaio, obteve-se uma boa sedimentação para a maior parte das doses de alumínio adicionadas à amostra, apresentando-se os flocos pequenos e claros. Todavia, muito dos flocos formados alojaram-se nas paredes dos recipientes utilizados no ensaio de “Jar-Test”. Nas doses de 18,25 e 20,25 mgAl/L, o precipitado apresentou-se disperso por toda a amostra.

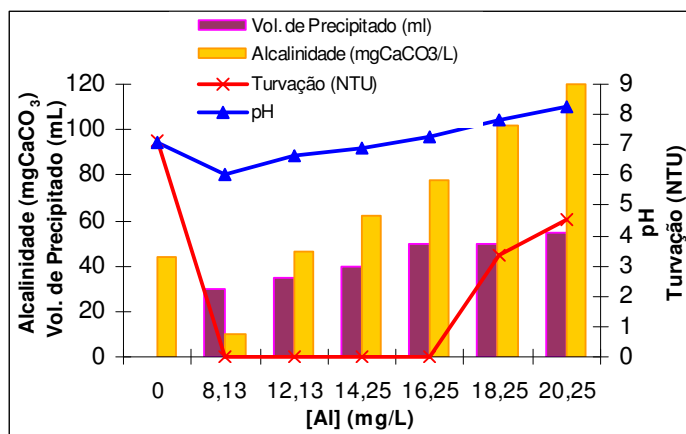


Figura 4.19 – Variação dos parâmetros analisados com a dose de alumínio

Neste ensaio, o pH, a alcalinidade e o volume de precipitado registaram um aumento dos seus valores com o aumento da dose de alumínio adicionada (Figura 4.19).

Os valores de turvação mantiveram-se nulos entre as razões 1:0 e 1:1 de sulfato de alumínio : aluminato de sódio, tornando a aumentar para as doses mais elevadas.

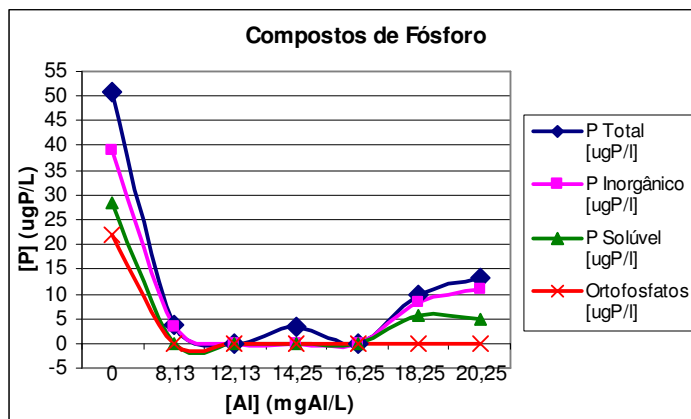


Figura 4.20 – Variação das diversas formas de fósforo com a dose de alumínio

Quanto aos compostos de fósforo, os seus valores, de um modo geral, diminuiram até a razão 1:0,75, a partir da qual se observa um novo aumento da concentração de fósforo (Figura 4.20).

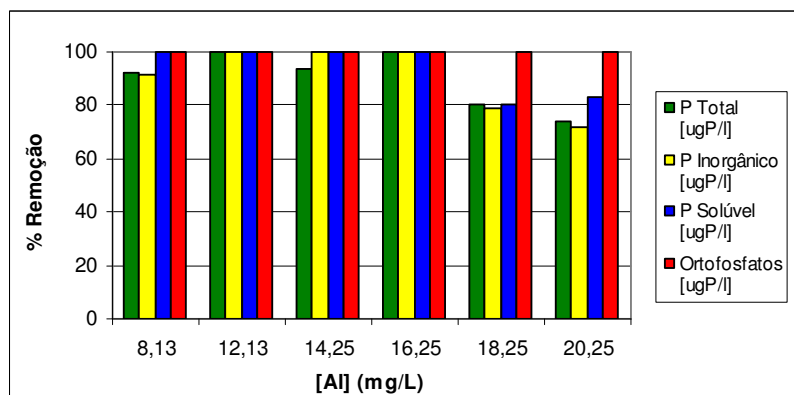


Figura 4.21 – Remoção (%) dos diversos compostos de fósforo com a dose de alumínio

Mais uma vez se verificou que a razão mais adequada foi a de 1:0,50 pois obtiveram-se remoções próximas de 100% para todos os compostos de fósforo (Figura 4.21) e os valores de pH e alcalinidade eram adequados. No entanto, tal como anteriormente, para a razão 1:0, em que apenas ocorreu a adição de sulfato de alumínio, obtiveram-se para os compostos de fósforo resultados considerados satisfatórios, apresentando estes valores inferiores a 10 $\mu\text{g/L}$ (Figura 4.20). No entanto, o pH e a alcalinidade apresentaram valores muito baixos, o que desaconselha a utilização desta dose de alumínio em razão 1:0.

Para este ensaio, foi ainda determinada a concentração de alumínio solúvel presente no sobrenadante após a realização do ensaio de coagulação-floculação e cujos resultados se encontram expressos na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Concentração de Alumínio solúvel presente no sobrenadante

[Al] Adicionada (mgAl/L)	[Al] Solúvel (mgAl/L)
0,00	0,02
8,13	0,13
12,13	< 0,02
14,25	< 0,02
16,25	0,06
18,25	0,11
20,25	0,81

A concentração de alumínio presente nos sobrenadantes foi demasiado oscilante, mas, na sua maioria, mantiveram-se abaixo do valor máximo admissível definido pelo Anexo VI (Qualidade da água para consumo humano) do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto. Todavia, tal como no ensaio anterior, para a dose de 20,25 mgAl/L, este valor foi ultrapassado.

4.5. AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO E VIABILIDADE DA SUA APLICAÇÃO

Considerando uma aplicação anual de qualquer um dos coagulantes em estudo em todo o volume da Lagoa (Figura 4.22), tornou-se necessário avaliar os custos de implementação e a viabilidade de aplicação de cada um deles.

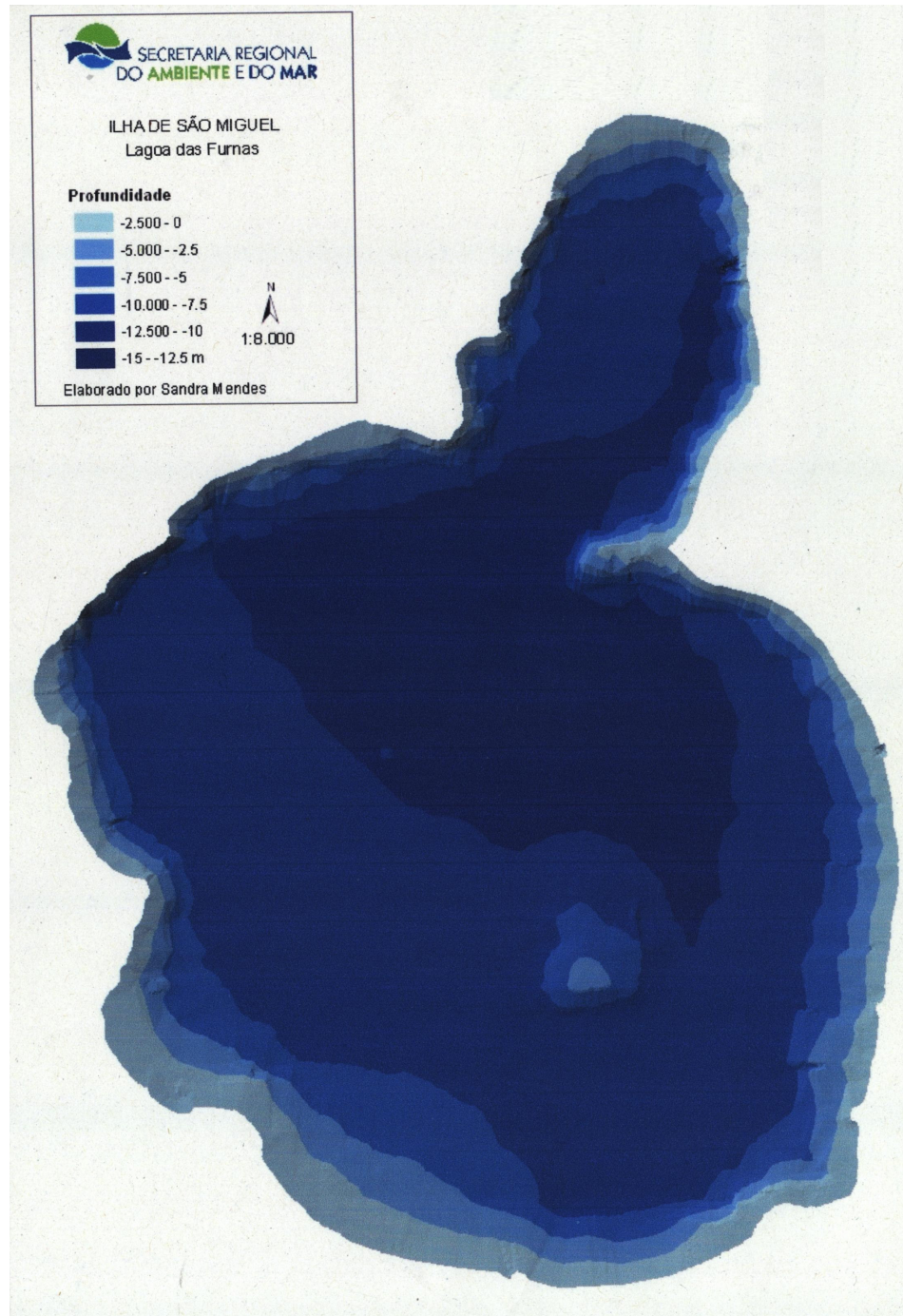


Figura 4.22 – Batimetria da Lagoa das Furnas

A Lagoa das Furnas apresenta um volume total médio de $1,33 \times 10^{10}$ litros, sobre o qual incidiria a aplicação dos coagulantes para a precipitação química dos compostos de fósforo como forma de remediação do estado trófico desta massa de água.

Avaliando os diversos preços disponibilizados por várias empresas que comercializam produtos químicos para o tratamento de águas, seleccionaram-se os apresentados na Tabela 4.18. O preço do aluminato de sódio diz respeito à aquisição de 20 kg de produto e poderá sofrer ainda um decréscimo substancial se forem adquiridas doses significativas.

Tabela 4.18 – Custos aproximados associados aos diferentes tipos de coagulantes a utilizar

Coagulante	Custo Aproximado*
Sulfato de Alumínio Sólido com 17% Al_2O_3 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$]	290 €/ton
Sulfato de Alumínio Líquido com 8,2% Al_2O_3 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$]	160 €/ton
Cloreto Férrico Solução a 40% (FeCl_3)	180 €/ton
Aluminato de Sódio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)	3 €/kg

* A estes valores é ainda acrescido o valor de IVA a 21%

4.5.1. Sulfato de Alumínio

Sendo necessários 7,56 g de sulfato de alumínio sólido com 17% de óxido de alumínio (Al_2O_3) e 6,64 g de sulfato de alumínio líquido com 8,2% de óxido de alumínio (Al_2O_3) para preparar soluções de sulfato de alumínio com 1,25 gAl/L, obtêm-se os custos totais apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Custos associados à adição de sulfato de alumínio

		Dose ideal [mgAl/L]	Volume de Solução 1,25g Al/L	Custos Associados ao Sulf. Al.	Adição de CaCO ₃ (mg/L)	Custos Associados ao CaCO ₃	Custos Totais*
Sulfato de Alumínio Sólido 17% Al ₂ O ₃ [Al ₂ (SO ₄) ₃ .14 H ₂ O]	Sem correção da Alcalinidade	3,75	3,0 mL/L	87 580 €	-	-	87 580 €
	Com correcção da Alcalinidade				22,0	17 580 €	105 160 €
					47,5	37 920 €	125 500 €
Sulfato de Alumínio Líquido 8,2% Al ₂ O ₃ [Al ₂ (SO ₄) ₃]	Sem correção da Alcalinidade	3,75	3,0 mL/L	42 400 €	-	-	42 400 €
	Com correcção da Alcalinidade				22,0	17 580 €	59 980 €
					47,5	37 920 €	80 320 €

* A estes valores é ainda acrescido o valor de IVA a 21%

4.5.2. Cloreto Férrico

Considerando que são necessários 36,21g de cloreto férrico (solução a 40%) para preparar um litro de solução de cloreto férrico com 5 gFe/L e que seriam necessários 5,0 mL da solução preparada por cada litro de água da Lagoa das Furnas tratada e sabendo que esta massa de água possui um volume total de $1,33 \times 10^{10}$ L, para a obtenção de resultados ideais, seriam necessárias 2 408 ton da solução de cloreto férrico a 40%, correspondentes a um custo total de **433 440 €** (valor ao qual ainda é acrescido o valor de IVA a 21%).

4.5.3. Aluminato de Sódio

Visto que o aluminato de sódio funciona de forma ideal em conjunto com o sulfato de alumínio, a avaliação de custos para este coagulante envolve uma análise conjunta com o alúmen (sulfato de alumínio). Tendo este facto em consideração e sabendo que se obtiveram melhores resultados para a dose de 12,13 mgAl/L, obtêm-se os custos apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Custos associados à adição de aluminato de sódio e sulfato de alumínio

Aluminato de Sódio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)		Sulfato de Alumínio Sólido 17% Al_2O_3 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$]		Sulfato de Alumínio Líquido 8,2% Al_2O_3 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$]	
Volume de Solução 1,25g Al/L	Custo Associado *	Volume de Solução 1,25g Al/L	Custo Associado*	Volume de Solução 1,25g Al/L	Custo Associado*
3,2 mL/L	425 600 €	6,5 mL/L	189 660 €	6,5 mL/L	91 840 €

* A estes valores é ainda acrescido o valor de IVA a 21%

Considerando os valores obtidos na tabela anterior, tem-se um custo total de **615 260 €** ou de **517 440 €**, conforme se use o sulfato de alumínio sólido ou líquido.

4.5.4. Quadro-Resumo

Na Tabela 4.21 sumarizam-se os custos associados a cada tratamento com os diferentes coagulantes em estudo.

Tabela 4.21 – Resumo dos custos associados a cada tratamento

		Custos Totais*
Sulfato de Alumínio Sólido 17% Al ₂ O ₃ [Al ₂ (SO ₄) ₃ .14 H ₂ O]	Sem correção da Alcalinidade	87 580 €
	Com correcção da Alcalinidade	105 160 €
		125 500 €
Sulfato de Alumínio Líquido 8,2% Al ₂ O ₃ [Al ₂ (SO ₄) ₃]	Sem correção da Alcalinidade	42 400 €
	Com correcção da Alcalinidade	59 980 €
		80 320 €
Cloreto Férrico (FeCl ₃)		443 440 €
Aluminato de Sódio (Na ₂ O.Al ₂ O ₃)	Sulfato de Alumínio Sólido 17% Al ₂ O ₃ [Al ₂ (SO ₄) ₃ .14 H ₂ O]	615 260 €
	Sulfato de Alumínio Líquido 8,2% Al ₂ O ₃ [Al ₂ (SO ₄) ₃]	517 440 €

* A estes valores é ainda acrescido o valor de IVA a 21%

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram ser possível a precipitação química de fósforo na Lagoa das Furnas através de coagulação-floculação-decantação, tanto mais que o arejamento artificial existente nesta Lagoa proporcionaria o efeito de mistura necessário ao processo.

Obtiveram-se bons resultados com o uso de sais de alumínio e ferro. Todavia, a adição de carbonato de cálcio juntamente com sulfato de alumínio constitui uma via alternativa de tratamento (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Doses ideais e parâmetros analisados

		Valores Finais			Vol. pp.	Remoção de Fósforo (%)			
		pH	Alcalinidade (mgCaCO ₃)	Turvação (NTU)		P _{Total}	P _{Solúvel}	P _{Inorg}	Orto
3,75 mgAl/L		6,93	23	-	-	74	67	76	100
		7,21	22	0,15	25	89	73	88	100
3,75 mgAl/L	22 mgCaCO ₃	7,01	27	-	12	90	67	92	100
	47,5 mgCaCO ₃	6,96	32	-	29	89	77	100	100
8,61 mgFe/L		6,42	18	0	19	88	74	100	100
1 alúmen:0 aluminato (8,13 mgAl/L)		5,61	12	0	30	90	73	100	100
		5,99	10	0	30	92	100	92	100
1 alúmen:0,5 aluminato (12,13 mgAl/L)		6,38	44	0	35	89	71	100	100
		6,62	46	0	35	100	100	100	100

Com efeito, nos ensaios de coagulação-floculação-decantação realizados apenas com adição de sulfato de alumínio como coagulante, os resultados foram consistentes, sendo a adição de 3,75 mgAl/L a dose ideal a utilizar. Para esta dose, obtiveram-se percentagens de remoção para os compostos de fósforo superiores a 60%, chegando mesmo a 100% no caso dos ortofosfatos, e, para os restantes parâmetros analisados, como o pH, a alcalinidade e a turvação, obtiveram-se valores considerados adequados, ou seja, valores de pH próximos da neutralidade, alguma alcalinidade residual na água e baixos valores de turvação.

Também nos ensaios realizados com adição de sulfato de alumínio juntamente com carbonato de cálcio, obtiveram-se resultados satisfatórios para a adição de 3,75 mgAl/L, sendo que a adição de carbonato de cálcio para correcção da alcalinidade permitiu uma precipitação ainda mais eficaz dos compostos de fósforo. Para esta dose, obtiveram-se percentagens de remoção para os compostos de fósforo, na sua maioria, superiores a 80%, chegando mesmo a 100% no caso dos ortofosfatos. Como nos ensaios realizados unicamente com o sulfato de alumínio, para a adição de 3,75 mgAl/L obtiveram-se valores de pH próximos da neutralidade, alcalinidade residual mais elevada e baixos valores de turvação.

A adição de carbonato de cálcio permite bons resultados quando usado em conjunto com outros, como o sulfato de alumínio.

O uso de cloreto férrico permitiu resultados satisfatórios para a adição de 8,61 mgFe/L, dose para a qual se obtiveram valores finais de pH e turvação adequados e percentagens de remoção superiores a 80%.

O uso em simultâneo de sulfato de alumínio e aluminato de sódio, apesar de mais dispendioso, seria mais aconselhado que a aplicação do primeiro composto isoladamente, porque se traduziria num menor consumo de alcalinidade da água e, consequentemente, numa menor diminuição do pH.

Em ambos os ensaios realizados com o aluminato de sódio em junção com o sulfato de alumínio (alúmen), pode-se afirmar, pela observação dos dados obtidos para os diversos compostos de fósforo analisados (à excepção dos ortofosfatos), que a adição de aluminato de sódio em igual ou superior quantidade que a de sulfato de alumínio, neutraliza o efeito do sulfato de alumínio sobre o fósforo, provocando um novo aumento da concentração dos vários compostos de fósforo na água. A razão de 1,0 de sulfato de alumínio para 0,5 de aluminato de sódio, correspondente à adição de 12,13 mgAl/L, seria a mais adequada para a obtenção de bons resultados. Para esta razão, obtiveram-se percentagens de remoção de compostos de fósforo, na sua maioria, superiores a 80%. No entanto, adicionando 8,13 mgAl/L (razão 1:0), já se obteriam resultados satisfatórios e a menores custos, visto que para esta dose não seria adicionado o aluminato de sódio, um reagente bastante dispendioso. Todavia, apesar de se obterem bons resultados para os compostos de fósforo, o mesmo não sucedeu com a alcalinidade e o pH que se apresentam demasiado baixos e invalidam o uso desta razão.

Relativamente aos custos de implementação do tratamento com os diversos coagulantes estudados, o uso de sulfato de alumínio com adição conjunta de carbonato de cálcio para correcção de alcalinidade seria o mais vantajoso, apesar de ainda apresentar custos elevados.

Os ensaios de coagulação-floculação-decantação não foram todos realizados *in situ*, a sua maioria foram realizados no laboratório da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, no Monte da Caparica, em água proveniente da Lagoa das Furnas, em São Miguel (Açores). Este facto, poderá ter alterado as características iniciais da água e os resultados obtidos com a adição de reagente/coagulante. Por outro lado, a qualidade da água desta Lagoa sofre variações sazonais, pelo que se aconselha a realização de um ensaio preliminar com as doses de coagulantes aqui apresentadas, se se pretender implementar o tratamento de remoção e inactivação de fósforo através de precipitação química do mesmo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDRADE, José; *São Miguel*, Clássica; Soluções Inovadoras; 155 pp.
- [2] ATSDR (1992); *Toxicological profile for aluminum and compounds*; Atlanta, Georgia; Agency for Toxic Substances and Disease Registry; 136 pp.
- [3] COOKE, G.D.; WELCH, E.B.; Peterson, s.a.; newroth, p.r.; 1993; *Restoration and Management of lakes and Reservoirs*; CRC Press; Boca Raton, Florida, USA, 548 pp.
- [4] FILIPEK, L.H., NORDSTROM, D.K. & FICKLIN, W.H. (1987); *Interaction of acid mine drainage with waters and sediments of West Squaw Creek in the West Shasta mining district*; California; Environmental Science & Technology, pp 388-396.
- [5] LANTZY, R.J. & MACKENZIE, F.T. (1979); *Atmospheric trace metals: global cycles and assessment of man's impact*; Geochim Cosmochim Acta; pp 511-525.
- [6] MANO, António Pedro; 2006; *Remoção de Fósforo por Via Físico-Química*; Sistemas de Tratamento de Água e Efluentes – 2006/2007; Departamento de Ciências e Tecnologia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 6 pp.
- [7] METCALF & EDDY, TCHOBANOGLIOUS, George (2003); *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*; 4th Edition; Mc Graw-Hill; New York; 1819 pp.
- [8] PACHECO, D. M., CYMBRON, Raquel, CÂMARA, Helena G., TAVARES, Jorge M. e BRITO, António G.; *Medidas de Requalificação Ambiental da Lagoa das Furnas, S. Miguel, Açores*, Direcção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos, Ponta Delgada.
- [9] PEREIRA, Luís Alberto Martins e RODRIGUES, Maria Armanda Reis (2005); *Avaliação do estado trófico das águas nas albufeiras da região de Lisboa e Vale do Tejo*; Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR – LVT); 44 pp.
- [10] PORTEIRO, J. M., 2000 – *Lagoas dos Açores – Elementos de Suporte ao Planeamento Integrado*; Departamento de Biologia da Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 344 pp.
- [11] *Relatório Síntese sobre a Caracterização das Regiões Hidrográficas previstas na Directiva-Quadro da Água*, Setembro 2005; Instituto da Água – Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional; 163 pp.
- [12] RODRIGUES, Ana, PACHECO, Dina, ROMANETS, Yuriy, BRUNS, Stefan, NOGUEIRA, Regina, COUTINHO, Rui e BRITO, António G.; *Modelação da Qualidade da Água da Lagoa das Furnas e da Lagoa Verde das Sete Cidades*; Direcção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos, Ponta Delgada.
- [13] SANTOS, M.C.R.; RODRIGUES, A.M.F.; SOBRAL, P.; SANTANA, F. (1994); *a Eutrofização de meios lacustres. Caso de estudo: A Lagoa do Fogo*; In: Actas da 4^a Conferência Nacional sobre a Qualidade do Ambiente – Volume I, 6 a 8 de Abril; Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente da Faculdade de Ciências e Tecnologia na Universidade Nova de Lisboa, pp 99-109.
- [14] SANTOS, M.C.R.; SANTANA, F.; MUELLE, H, 2005; *Estudo da Evolução da Qualidade da Água, dos Desenvolvidos de Cianobactérias e Toxicidade associada nas Lagoas das Sete-Cidades e Furnas (S. Miguel – Açores)*, Relatório de 2004, Parte II – Lagoa das Furnas, DCEA/FCT/UNL, 29 pp.
- [15] SCHECHER, W.D. & DRISCOLL, C.T. (1987); *An evaluation of uncertainty associated with aluminum calculations*; Water Resources Research; pp 525-534.
- [16] SMITH, E.J., DAVISON, W., HAMILTON-TAYLOR, J.; *Methods for preparing synthetic freshwaters*; Water Research 36 (2002); pp 1286-1296.

- [17] *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* - 1998, 20th Edition, American Public Health Association - American Water Works Association - Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- [18] VON SPERLING, M. (1996); *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*; DESA – UFMG.
- [19] WETZEL, R. G., 1993 - *Limnologia*, Fundação Calouste Gulbenkian; Lisboa, 919 pp.
- [20] www.diramb.gov.pt.
- [21] www.pbase.com